

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени  
политехнический институт

На правах рукописи

Л. И. СОКОЛИК

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ЗАЩИТА ОСРЕДНОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(Специальность № 05.271 - "Электрические станции")

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Диссертация на русском языке

Минск 1971

Работа выполнена в лаборатории энергосистем Белорусского филиала энергетического научно-исследовательского института им. Г. М. Крижановского.

Научный руководитель -  
кандидат технических наук, доцент  
В. И. Новаш

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
Г. М. Павлов,  
кандидат технических наук  
Г. П. Сбродов

Ведущее предприятие -  
Белорусское отделение "Энерго-  
сетьпроект".

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1972 г.  
Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1972 г. на заседа-  
нии Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим  
специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Зна-  
мени политехническом институте.

Заверенный и скрепленный печатью отзыв на автореферат в  
2 экземплярах просим направлять по адресу: г. Минск-27, Ленин-  
ский проспект, 65, Белорусский политехнический институт. Уче-  
ному секретарю Совета.

О дне защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета -  
кандидат технических наук

Л. Л. ЧЕРВИНСКИЙ

## В В Е Д Е Н И Е

Актуальные задачи релейной защиты (РЗ) в современных условиях определяются основными тенденциями развития электроэнергетики. Увеличение единичной мощности электрических машин и электроустановок, создание уникальных машин и электропередач предъявляют к РЗ все более жесткие требования быстроты действия, чувствительности, селективности и надежности. Эти требования, являясь техническими, имеют в конечном счете экономическую направленность. Например, мощность в единице крупнейших генераторов возросла за послевоенные годы в несколько раз, и соответственно возросла их стоимость. Технические же параметры РЗ, в частности, защиты от внутренних повреждений, возросли далеко не так значительно. Следовательно, экономический ущерб от возможного повреждения генератора возрос. Поэтому для ограничения размеров повреждения оборудования, а также последствий аварии для энергосистемы и потребителей необходима разработка усовершенствованных защит.

Цель настоящей работы — исследование целесообразности при менения дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) для шин, генераторов, трансформаторов и автотрансформаторов, блоков генератор-трансформатор и других элементов электрических систем, которые можно называть сосредоточенными, имея в виду протяженность в пространстве защищаемой зоны, при которой еще можно обойтись без телеканалов. В известных работах при осуществлении ДФЗ шин использовано важное преимущество диффазного принципа — селективность защиты при значительной (более 10%) погрешности измерительных трансформаторов тока (ТТ). В настоящей работе обоснована возможность повышения на основе принципа ДФЗ также и чувствительности. Применение при разработке полупроводников позволяет повысить быстроту действия и надежность защиты.

Работа состоит из 4 глав и приложений (текста 142 стр.,  
рисунков 47, всего 189 стр).

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ И ОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ СООБРАДТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время не вызывает сомнения, что лучшим видом РЗ от внутренних междофазных повреждений элементов энергосистем является дифференциальная защита (ДЗ) продольного типа. Разработанная в 1904 г. ДЗ в дальнейшем получила широкое распространение и постоянно совершенствовалась под влиянием противоречия важнейших практических требований чувствительности и селективности при заданной погрешности ТТ. Одним из способов разрешения этого противоречия стало применение ДЗ с торможением (ДЗТ). ДФЗ возникла при осуществлении ДЗ линий, благодаря необходимости использовать только один телеканал. В качестве измерительного элемента для линейных ДФЗ применяется комбинированный фильтр тока, чаще всего, типа  $I_1 + kI_2$ . В результате опыта эксплуатации ДФЗ выяснилось, что она может иметь преимущество перед обычными ДЗ в отношении погрешности ТТ подобно ДЗТ.

Принцип ДФЗ привлекает внимание исследователей. У нас и за рубежом предложены различные варианты ДЗ, в той или иной мере использующие диффазный принцип. Интересно отметить, что фирмой НВС запатентована ДЗ трансформатора, содержащая фильтры симметричных составляющих тока. Известные ДЗ классифицируются интуитивно, а их преимущества формулируются на словесном уровне. Это касается и защит, использующих принцип сравнения фаз. Для объективной оценки ДЗ различного исполнения в настоящей работе предлагается сравнивать не схемы или отдельные параметры, а некоторые общие характеристики, которые для реальных защит могут быть получены экспериментально. Основой для такого сравнения могут быть теоретические характеристики трех основных типов защит: простой дифференциальной токовой, дифференциальной токовой с линейно зависимым торможением и дифференциально-фазной. Для простоты рассматриваются в симметричном стационарном режиме защиты некоторой зоны, имеющей два входа. Плечи защиты, включая ТТ, одинаковы. При отсутствии выходящего к.з.

$$\dot{I}_I + \dot{I}_{II} = 0, \quad (1)$$

где  $\dot{I}_I$  - первичный ток одного входа;  
 $\dot{I}_{II}$  - первичный ток второго входа.

1. Графо-аналитические характеристики простой дифференциально-токовой защиты.

а) В комплексной плоскости.

Условие срабатывания:

$$|\dot{I}_I + \dot{I}_{II}| > |\dot{I}_{ср}|, \quad (2)$$

где  $|\dot{I}_{ср}| = \text{const}$  - ток срабатывания.

Уравнение характеристики:

$$\dot{I}_I + \dot{I}_{II} = \dot{I}_{ср}. \quad (3)$$

Поскольку токи входов в общем случае независимы, то выражение (3) не может иметь в комплексной плоскости отображения: содержит два независимых вектора. Если зафиксировать один из них по величине и фазе, например, на действительной оси, то характеристика будет определяться изменением другого вектора:

$$\dot{I}_I = \dot{I}_{ср} - \dot{I}_{II} \quad (4)$$

или

$$\dot{I}_{II} = \dot{I}_{ср} - \dot{I}_I \quad (5)$$

Графическое построение по выражению (4) представлено на рис. 1а.

б) На действительной оси.

Условие срабатывания:

$$|I_I + I_{II}| > I_{ср}. \quad (6)$$

Уравнение характеристики:

$$I_I + I_{II} = \pm I_{ср}. \quad (7)$$

График выражения (7) представлен на рис. 1б.

2. Аналитические характеристики дифференциальной защиты с торможением, линейно зависящим от тока.

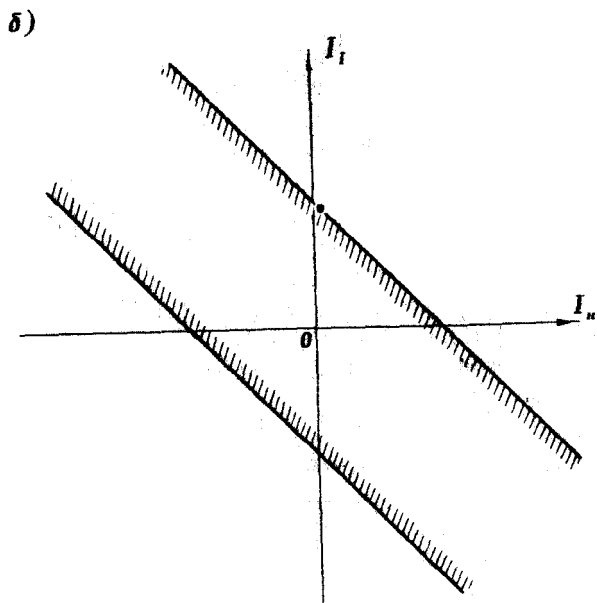
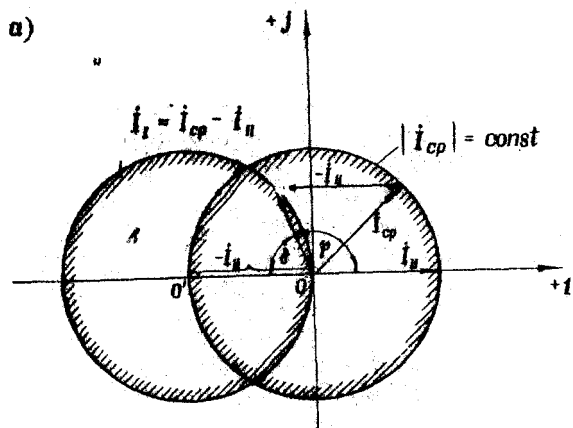


Рис. I. Характеристики дифференциальной защиты

а) В комплексной плоскости.

Условие срабатывания:

$$|\dot{I}_I + \dot{I}_II| \geq I_{\text{ср. min}} + k_T \{ |\dot{I}_I| + |\dot{I}_II| \}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{ср. min}} = \text{const}$  - ток срабатывания при отключенных тормозных системах;

$k_T$  - коэффициент торможения.

Уравнение характеристики:

$$|\dot{I}_I + \dot{I}_II| = I_{\text{ср. min}} + k_T |\dot{I}_I| + k_T |\dot{I}_II|. \quad (9)$$

Считая вектор  $\dot{I}_II$  зафиксированным в положительном направлении действительной оси, записываем относительно  $\dot{I}_I$  в осях  $x - y$ :

$$\sqrt{(x + I_{II})^2 + y^2} = I_{\text{ср. min}} + k_T \sqrt{x^2 + y^2} + k_T I_{II}. \quad (10)$$

Задавшись  $I_{\text{ср. min}} / I_{II} = 1/3$  и  $k_T = 0,5$ , получим:

$$x^4 + 2x^2y^2 + y^4 + 16x^3 + 16xy^2 + 60x^2 - 3,76y^2 + 58,4x + 13,45 = 0. \quad (11)$$

Это выражение кривой, известной как улитка Паскаля, или кардиоида (рис.2а, кривая 1).

В полярных координатах выражения (10) и (11) значительно упрощаются:

$$\sqrt{(I_I \cos \varphi + I_{II})^2 + (I_I \sin \varphi)^2} = I_{\text{ср. min}} + k_T I_I + k_T I_{II}, \quad (12)$$

$$I_I^2 + (8 \cos \varphi - 3,33) I_I + 3,67 = 0 \quad (13)$$

При торможении только от  $\dot{I}_I$  получаем:

$$I_I^2 + (8 \cos \varphi - 1,335) I_I + 10,7 = 0. \quad (14)$$

При торможении только от  $\dot{I}_II$

$$I_I^2 + 6 I_I \cos \varphi + 2,75 = 0. \quad (15)$$

В последнем случае характеристика ДЗТ имеет вид окружности. Граничные линии по (14) и (15) представлены на рис.2а (кривые 3 и 2).

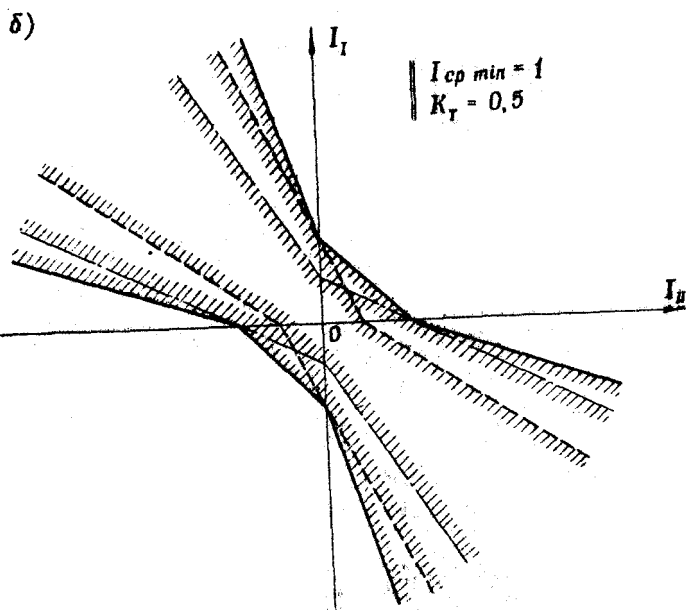
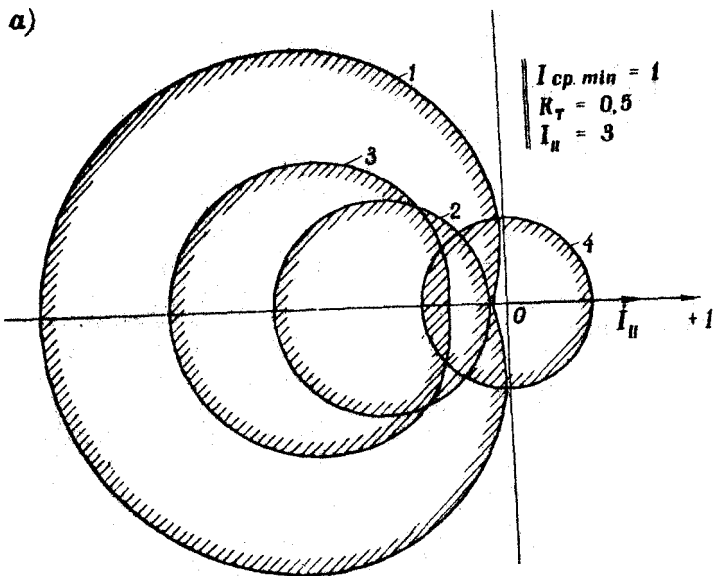


Рис. 29. Характеристики дифференциальной защиты с торможением.  
 1 — торможение от обоих токов; 2 — торможение от  $I_H$ ;  
 3 — торможение от  $I_T$ ; 4 — одностороннее питание, тормо-  
 жение выключено



б) На действительной оси.

Условие срабатывания:

$$|I_I + I_{II}| \geq I_{\text{ср. min}} + k_T |I_I| + k_T |I_{II}|. \quad (16)$$

Уравнение характеристики:

$$I_I + I_{II} = \pm I_{\text{ср. min}} \pm k_T |I_I| \pm k_T |I_{II}|. \quad (17)$$

Характеристики по (17) построены на рис.2б.

3. Идеализированные характеристики дифференциально-фазной защиты сосредоточенных элементов электрических систем.

Для ДФЗ нельзя написать связанных выражений, определяющих условие срабатывания и уравнение характеристики. Однако, на основании имеющихся опытных данных можно построить идеализированные характеристики ДФЗ в той же форме, что и ДЗ, и ДЗТ (рис.3 и 4). Заметим, что эта форма построения характеристик более употребительна для ДФЗ. Теоретическое построение характеристик ДФЗ на основе математической логики предпринято в 3 главе. Характеристики ДФЗ по рис.3 и 4 отличаются величиной параметра, который предложено называть током блокирования. На рис.4 б отрезки  $OA=OB=OC=OD=I_{\text{ср}}$  представляют собой ток срабатывания, отрезки  $AE=BF=CG=DH=I_{\text{бл}}$  - ток блокирования. Прямые  $KL$  характеризуют условие (I) на действительной оси. Отрезок  $SR$  и ему подобные представляют собой наибольшую допустимую разницу токов входов (плеч) в нормальном режиме и при внешнем к.з. Характеристики ДФЗ при равенстве токов срабатывания и блокирования (рис.3б) неудобны тем, что при прохождении точек  $M$  и  $N$  возможно срабатывание. Поэтому практически оправдан переход к характеристикам вида рис.4 и введение третьего параметра ДФЗ - тока блокирования таким образом, что

$$\frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{бл}}} > 1. \quad (18)$$

Характеристики по рис.4 допускают нарушение условия (I) вплоть до перемещения прямой  $KL$  в положение  $K'L'$ . Практически это может быть вызвано неравенством токов входов, если характеристики построены в функции первичных токов, или неравенством токов плеч, если характеристики построены в функции вторичных токов. Если параметры входов неодинаковы, симметрия

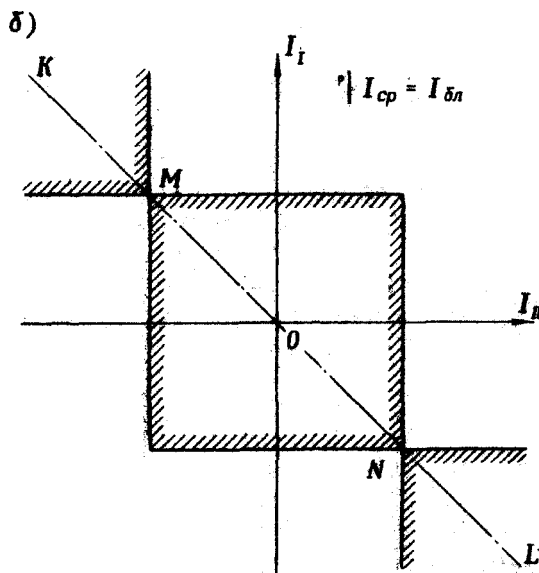
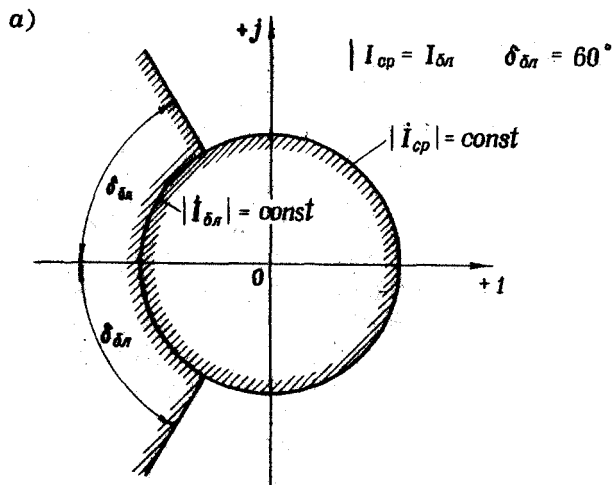


Рис. 3. Характеристики дифференциально-фазной защиты при  $I_{cp} = -I_{\delta n}$

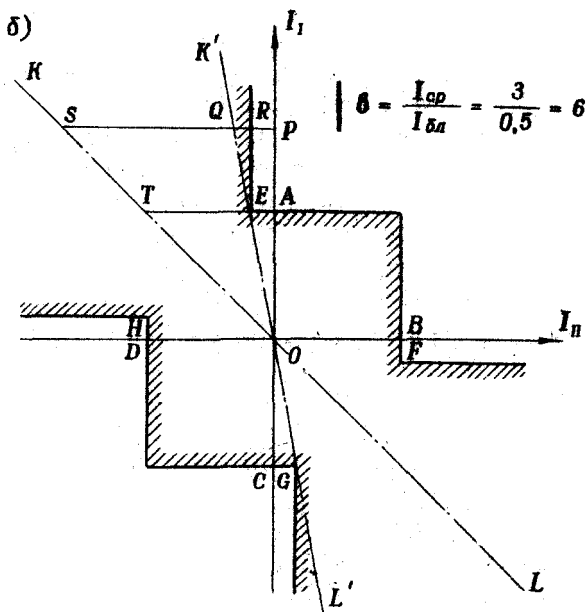
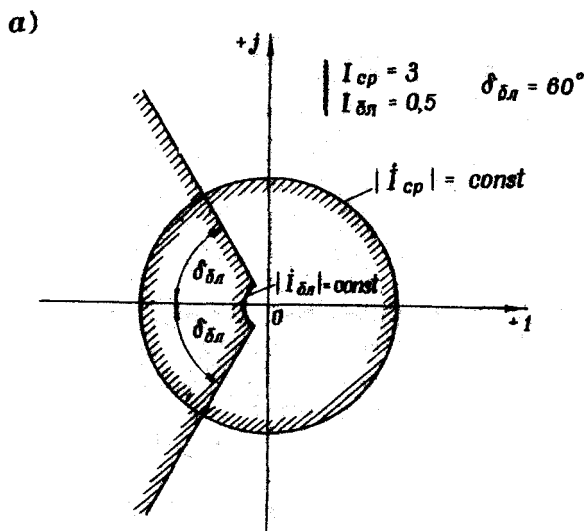


Рис. 4. Характеристики дифференциально-фазной защиты при  $I_{cp} > I_{\delta n}$

характеристик нарушается. Если различны, например, только коэффициенты трансформации ТТ, удобно пользоваться характеристиками, построенными в функции вторичных токов, которые будут симметричны.

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Известные ДФЗ сосредоточенных объектов выполняются пофазными или односистемными в зависимости от конструкции измерительных элементов. Односистемные ДФЗ имеют измерительные элементы в виде фильтров-сумматоров. Использование фильтров симметричных составляющих в РЗ как правило преследует две цели: а) повышение чувствительности, б) упрощение защиты за счет ее выполнения по односистемной схеме.

На рис. 5 приведены схемы предложенных нами измерительных элементов. Основные достоинства сумматорного измерительного элемента, в особенности трансреакторного, — простота и небольшие габариты. Трансреакторы также хорошо работают в переходных режимах. Существенным недостатком фильтр-сумматора является комплексная сопряженность коэффициентов при симметричных составляющих прямой и обратной последовательности тока, что при несимметричных междофазных к.з. без земли в некоторых случаях не позволяет осуществить преимущественное сравнение фаз токов обратной последовательности. Э.д.с. сумматора по схеме рис. 5а и б в линейном режиме:

$$\dot{E}_c = k_M (\sqrt{3} e^{j90^\circ} \dot{I}_{a1} + \sqrt{3} e^{-j90^\circ} \dot{I}_{a2} + 6 \dot{I}_{a0}), \quad (19)$$

$k_M$  — коэффициент передачи.

Для устранения указанного недостатка разработан малогабаритный фильтр симметричных составляющих (ф.с.с.) тока (рис. 5а). Предложенный фильтр можно сбалансировать как фильтр обратной (прямой) последовательности тока или настроить как комбинационный типа  $\dot{I}_1 + k \dot{I}_2$ , регулируя величину сопротивления  $R_2$ .

Осуществимы два варианта настройки ф.с.с. на заданную величину коэффициента  $k$  :

$$1) U_2 > U_1, \quad 2) U_2 < U_1, \quad (20)$$

где значения  $U_1$  и  $U_2$  ясны из рис.5в.

Выходное напряжение при холостом ходе ф.с.с., настроенного с  $k = 6$ , составляет для первого варианта настройки:

$$\dot{U}'_{\phi.xx} = (\dot{I}_{a1} + 6e^{j156^\circ} \dot{I}_{a2}) 0,8 e^{-j73^\circ}, \quad (21)$$

для второго варианта настройки:

$$\dot{U}''_{\phi.xx} = (\dot{I}_{a1} + 6e^{-j35^\circ} \dot{I}_{a2}) 0,6 e^{j107^\circ}, \quad (22)$$

где  $\dot{I}_{a1}$  - ток фазы "а" прямой последовательности;

$\dot{I}_{a2}$  - ток фазы "а" обратной последовательности.

Разработана методика расчета предложенного ф.с.с.

Показано, что предложенный ф.с.с. в отличие от известных меньше по размерам, а его выходное напряжение больше.

Предложенный ф.с.с. исследован в режиме холостого хода и активной нагрузки с использованием ЦВМ. При этом оценивалось влияние изменений частоты тока и температуры окружающей среды на настройку ф.с.с.

Расчет на ЦВМ показал, что коэффициент ф.с.с., настроенного как комбинированный, не зависит от величины сопротивления его активной нагрузки. Фаза выходного напряжения ф.с.с. при изменении активного сопротивления, на которое нагружен ф.с.с., меняется меньше при первом варианте настройки: 17,5 эл.град. при изменении сопротивления нагрузки от 50 до 2000 ом против 25 эл.град. при втором варианте настройки.

При изменении температуры в диапазоне  $-40$ – $+40^\circ\text{C}$  коэффициент фильтра претерпевает наименьшие изменения, когда сопротивления плеч термостабильны:  $-0,0034\%/^\circ\text{C}$  при первом варианте настройки и  $+0,00298\%/^\circ\text{C}$  при втором варианте настройки. Несколько меньшие значения получаются, если обеспечена термостабильность сопротивления  $R_2$ . Термостабильность регулировочных сопротивлений ф.с.с. может быть достигнута применением двух последовательных резисторов с различными температурными зависимостями сопротивления - угольно-мастичных (типа МЛТ) и проволочных (типа ППЗ).

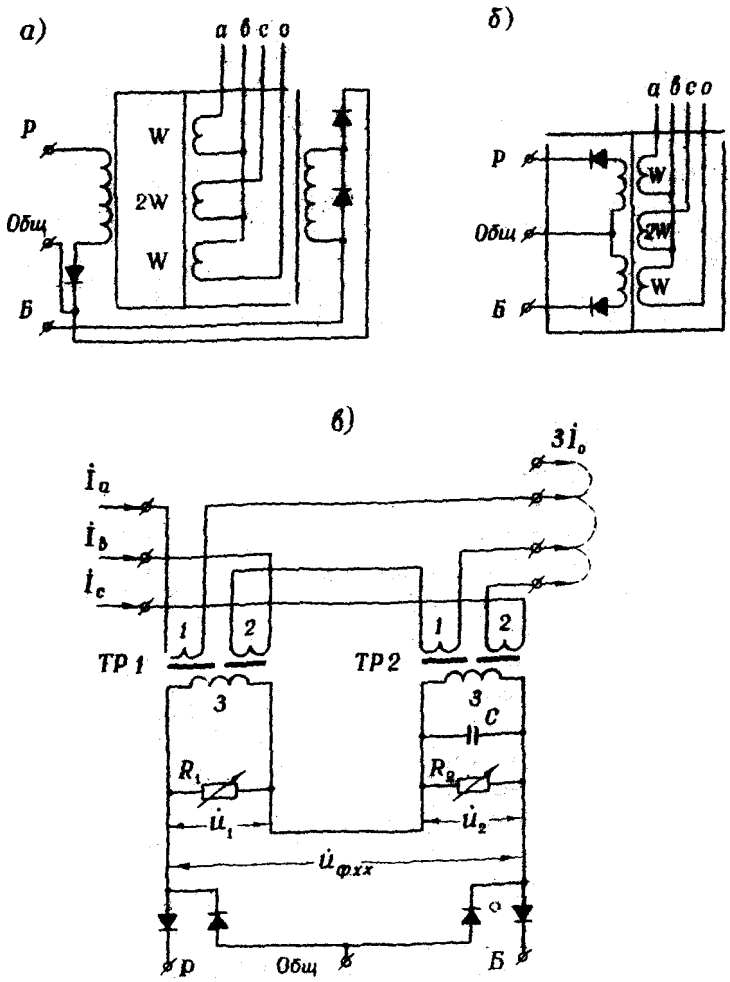


Рис. 5. Варианты исполнения измерительного элемента дифференциально-фазной защиты сосредоточенных элементов электрических систем: а) сумматор с насыщающимся стержнем; б) трансреакторный сумматор; в) фильтр симметричных составляющих тока; P - рабочий импульс; Б - блокирующий импульс; Общ. - общий полюс

При изменении частоты в пределах 46,5-56 гц отклонения К ф.с.с. составляют 16,7% в первом варианте и 21,6% во втором варианте настройки.

Таким образом, первый вариант настройки представляется наилучшим.

Проведены также расчеты показателей данного ф.с.с. в случае его использования как фильтра обратной последовательности.

Исследована работа данного ф.с.с. в переходных режимах путем экспериментов и на АВМ.

В результате исследований установлено, что ф.с.с. данного типа практически не пропускает аperiodической составляющей. При большом К и искаженном вторичном токе ТТ выходной сигнал ф.с.с. искажен. При меньших К и включении ф.с.с. на выделение прямой последовательности искажения на выходе ф.с.с. значительно меньше.

Предложенный ф.с.с. применен в качестве измерительного элемента ДФЗ блока 165 МВт Березовской ГРЭС и ДФЗ или ЦО кв п/ст "Западная" Белорусской энергосистемы.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗРАБОТКА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследования, проведенные с использованием математической логики, показали, что характеристики ДФЗ, удовлетворяющие соотношению (18), могут быть получены на основе использования в исполнительном органе операция "ЗАПРЕТ" ("НЕТ") и соответствующей логической схемы. Альтернативой является использование элемента отрицания ("НЕ"), называемого также инвертором. В последнем случае орган обрабатывает при отсутствии токов и требует отдельного пускового устройства. Путем формально-логического вывода получены теоретические характеристики ДФЗ, совпадающие с идеализированными характеристиками, описанными выше.

Исполнительные органы логического типа на основе операции "ЗАПРЕТ" реализованы с помощью полупроводников (рис.6).

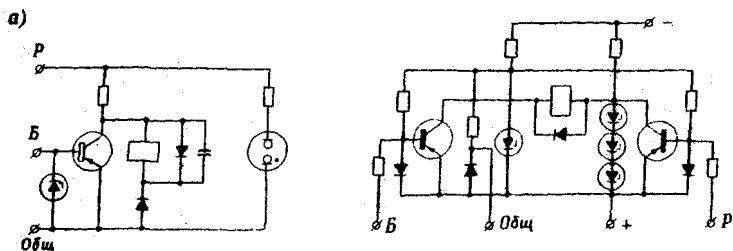


Рис. 6. Исполнительные органы дифференциально-фазной защиты сосредоточенных элементов электрических систем: а) для схем с насыщающимися сумматорами; б) для схем с трансреакторными сумматорами или комбинированными фильтрами. Р - вход рабочего импульса; Б - вход блокирующего импульса; Общ. - общий полюс входов

Реальные характеристики исполнительных органов логического типа близки к теоретическим.

В теоретическом плане исследованы характеристики фазосравнивающего органа на основе логической операции "ЗАПРЕТ" в комплексной плоскости сопротивлений. Форма этих характеристик (рис. 7) такова, что может быть применена для фазограничивающих реле в схемах дистанционной защиты. Сектор срабатывания располагается при этом соосно углу максимальной чувствительности направленного реле сопротивления, если надо ограничить его характеристику, или по направлению угла к ЛЭП, если надо ограничить характеристику ненаправленного реле.

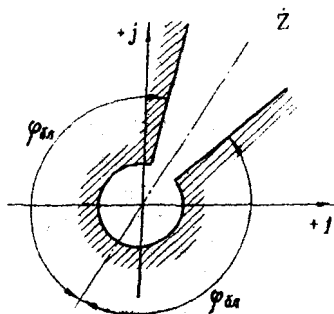


Рис. 7. Характеристика фазосравнивающего органа на основе операции "ЗАПРЕТ" в комплексной плоскости сопротивлений

С точки зрения экономии соединительных проводов в особенности в односистемных



схемах представляет интерес новый способ выполнения дифференциальной защиты на принципе неодиначности полуволн сигналов, поступающих от измерительных элементов. Исполнительный орган на этом принципе (рис. 8) позволил получить характеристики по типу ДФЗ и по типу ДЗТ.

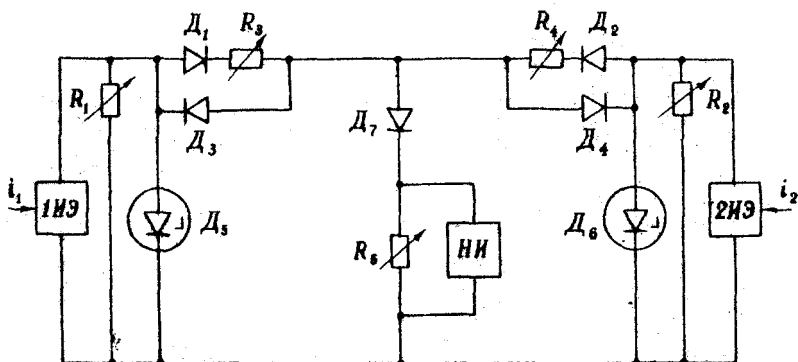


Рис. 8. Схема исполнительного органа на принципе неодиначности полуволн. 1, 2 ИЭ - измерительные элементы;  $R_1$  и  $R_2 = 400$  Ом;  $R_3$  и  $R_4 = 510$  Ом;  $D_1, D_2, D_7$ , типа Д7Ж;  $D_3$  и  $D_4$  типа Д7Ж или Д226;  $D_5$  и  $D_6$  типа Д809;  $R_5 = 290$  Ом; НИ - нуль-индикатор

Показана возможность синтеза помехоустойчивых схем ДФЗ с увеличенной надежностью на срабатывание и повышенным быстродействием, а также схем с увеличенной надежностью на несрабатывание.

#### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В результате исследования фильтрового измерительного элемента при бросках тока намагничивания (б.т.н.) силовых трансформаторов и автотрансформаторов установлено, что при б.т.н. выполняются условия срабатывания исполнительного органа

на ДФЗ. Поэтому правильность поведения ДФЗ таких объектов должна быть обеспечена специальными мерами блокировки. Поскольку измерительные элементы и исполнительный орган для удобства комплектования защит различных объектов выполнены автономными, то устройство блокировки при б.т.н. (УБТН) призвано целесообразным выполнить также автономным.

Известны следующие принципы блокирования действия ДЗ при б.т.н.: 1) введение выдержки времени, 2) загрузка защиты, 3) пуск по напряжению, 4) использование формального признака — факта подачи команды на выключение, 5) непосредственная оценка индукции в магнитопроводе, 6) использование особенностей формы кривой б.т.н. Последний принцип применяется наиболее широко. Известные способы его реализации по существу используют наличие в б.т.н. аperiodической составляющей или высших гармоник. Из высших гармоник чаще используется в настоящее время вторая. Так как УБТН в данном случае предназначено для работы в составе односистемной ДФЗ, выполненной на полупроводниках, оно также выполнено односистемным и полупроводниковым. Используемые обычно в полупроводниковых устройствах РЗ входные промежуточные трансформаторы и трансреакторы малогабаритны, имеют небольшое сечение железа и плохо трансформируют аperiodическую составляющую. Поэтому УБТН выполнено реагирующим на вторую гармонику тока (рис. 9).

Содержание второй гармоники в аperiodическом б.т.н. составляет по отношению к первой гармонике 17–43%, а в периодическом б.т.н. содержание второй гармоники до 87%. Вторая гар-

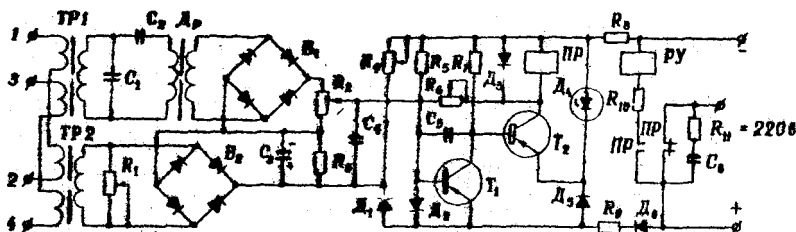


Рис. 9. Принципиальная схема устройства блокировки при бросках тока намагничивания (УБТН)

коника может существовать не только при б.т.н., поэтому УБТН должно реагировать не на факт ее наличия, а на ее относительную величину. При внутреннем к.з. вторая гармоника составляет относительно первой около 3% по данным фирмы GEC. Исходя из этих величин, уставка УБТН по относительной величине второй гармоники лежит в пределах 15-30%. Исследования УБТН в переходных режимах подтверждают мнение о необходимости дополнять чувствительную ДЗ с УБТН дифференциальной отсечкой при больших токах внутреннего повреждения, когда в переходном режиме ТТ насыщаются аperiodическим током и содержание тока второй гармоники во вторичном токе ТТ может достичь уставки УБТН и вызвать блокирование чувствительной ДЗ.

Исследован вариант УБТН на основе вышеописанного фильтра симметричных составляющих тока. Предпочтительным оказался вариант с суммирующим фильтром. Значительные улучшения внесены в УБТН, благодаря исследованию вариантов его в переходных режимах.

ДЗ с током срабатывания меньше номинального при обрывах или других неисправностях, например, в цепях тока могут действовать неправильно. Проведенный анализ показал, что специальные блокирующие устройства, предотвращающие такое неправильное действие ДЗ, будут соизмеряемы по сложности с самой ДЗ а поскольку к ним предъявляется требование действовать быстрее самой защиты, то в отношении быстродействия они должны ее даже превосходить. Поэтому сделан вывод о целесообразности применения резервирования в схеме защиты. Учитывая высокую ответственность защищаемого элемента и сложность специальных блокирующих устройств, может быть оправдано применение двух дублирующих друг друга комплексов ДЗЗ, включенных на различные группы ТТ. С точки зрения экономии аппаратуры представляет интерес частичное дублирование на принципе саморезервирования измерительных элементов, который осуществим, благодаря следующим схемам "ИЛИ", через которые измерительные элементы подключаются к исполнительному органу. Дублирующие измерительные элементы подключаются к другой группе ТТ той стороны защищаемого элемента, где надежность токовых цепей понижена. Разработанная аппаратура позволяет реализовать оба метода резервирования: применение резервирования (дублирования) в том

или иным виде ставит чувствительную защиту по надежности на несрабатывание при обрывах токовых цепей на один уровень с защитами, ток срабатывания которых выбран по условию отстройки от обрыва больше номинального.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически получены характеристики в комплексной плоскости токов и на действительной оси (в осях токов) трех основных типов продольной ДЗ. Путем сопоставления этих характеристик показано, что ДФЗ может применяться для сосредоточенных элементов электрических систем с целью повышения чувствительности и селективности ДЗ.

Подтверждено, что ДФЗ принципиально не требует в определенной мере выравнивания токов плеч и, следовательно, может быть применена для объектов типа регулируемых силовых трансформаторов, у которых отношение токов плеч не только отлично от единицы, но и сильно меняется в зависимости от положения переключателя отпаек.

Показана необходимость введения третьего параметра ДФЗ, который предложено называть "током блокирования".

2. Наиболее полно реализовать преимущества ДФЗ позволяет фильтровое исполнение, которое лучше сумматорного и пофазного в отношении чувствительности при несимметричных к.з. Предложен новый малотабаритный ф.с.с. тока. Разработан метод его расчета. Проведены его исследования для оценки стабильности параметров настройки и работы в переходных режимах.

3. С помощью математической логики обосновано применение логического элемента "ЗАПРЕТ" для фазосравнивающего исполнительного органа ДФЗ и получены теоретические характеристики ДФЗ. Получены характеристики данного фазосравнивающего органа в комплексной плоскости сопротивлений. Данный орган логического типа реализован с применением полупроводниковых приборов.

Исследованы характеристики некоторой новой схемы выполнения ДЗ на принципе неодинаковости полуволи двух сравниваемых электрических сигналов. Эта схема позволяет получать характеристики по типу ДФЗ и ДЗТ.

4. Разработан и исследован вариант УБТН, срабатывающий при определенном уровне тока второй гармоники, оцениваемом относительно первой гармоники тока.

5. Основные органы ДФЗ сосредоточенных элементов электрических систем: комбинированный фильтр тока (ФТК), реле сравнения фаз (РСФ), устройство блокировки при бросках тока намагничивания (УБТН) разработаны в автономном исполнении, что позволяет комплектовать схемы ДФЗ различных объектов.

В схемах ДФЗ с целью повышения надежности при обрывах цепей и других неисправностях целесообразно применять резервирование (дублирование) полное и частичное (саморезервирование).

Показана возможность создания двухполупериодных помехоустойчивых схем ДФЗ с соединением выходных цепей по схеме "И" с повышенной надежностью на несрабатывание при помехах и по схеме "ИЛИ" - с повышенной надежностью на срабатывание и с большим омысрабатыванием.

7. Разработанная ДФЗ внедрена в эксплуатацию на блоке 165 МВт Березовской ГРЭС с минимальными параметрами срабатывания по току прямой последовательности  $0,4I_{ном}$  и обратной последовательности  $0,07I_{ном}$ . Время срабатывания РСФ при двукратном токе срабатывания 20 мс. Аналогичная защита установлена для шин 110 кв/ п/ст "Западная" в г.Минске. Потребление защиты в цепях переменного тока не более 3 ва на фазу и в цепи постоянного тока 15 вт.

Практическим результатом работы автора в области ДФЗ сосредоточенных элементов электрических систем являются также несколько вариантов ДФЗ шин, эксплуатирующихся в Белорусской и других энергосистемах Совза, общим количеством более десяти комплектов. Результаты эксплуатации удовлетворительные.

Аппаратуру ДФЗ изготавливает производственное предприятие "Белорусэнергоаппарат".

О результатах работы по теме диссертации сообщалось в докладах на конференциях профессорско-преподавательского состава и представителей производства в Белорусском политехническом институте в 1964 и 1970 гг.; на научно-техническом семинаре "Опыт эксплуатации устройств релейной защиты и электродвигателей" в г.Тула в 1966 г.; на 3 республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии в г.Минске в 1970 г.

По теме диссертация опубликованы следующие работы:

1. Соколик Л.И. Дифференциально-фазная защита. Авт. св. СССР № 162210. МПК H02H. Опубликовано 16.04.1964. Бюллетень № 9. Заявлено 23.07.1962.

2. Соколик Л.И. Дифференциально-фазная защита шин. В сб. "Опыт эксплуатации энергетического оборудования предприятиями Белорусской энергосистемы". Минск, 1964.

3. Соколик Л.И. Дифференциально-фазная защита шин. "Эл. станции", 1966, № 2.

4. Григорович Е.И., Соколик Л.И. Применение устройств релейной защиты и автоматики на полупроводниковых приборах. В сб. "Передовой опыт эксплуатации в Белорусской энергосистеме". М., "Энергия", 1968.

5. Соколик Л.И. Разработка, внедрение и опыт эксплуатации дифференциально-фазных защит шин высшего напряжения в Белорусской энергосистеме. Краткие тезисы докладов научно-технического всесоюзного совещания "Опыт эксплуатации устройств релейной защиты и электроавтоматики". Тула, 1966.

6. Соколик Л.И. О характеристиках дифференциально-фазной защиты. "Известия вузов. Энергетика", 1968, № 10.

7. Соколик Л.И. Дифференциально-фазная защита. Авт. свид. СССР № 232357, зависимое от авт. св. № 162210. МПК H02H. Опубликовано 11.12.1968. Бюллетень № 1 за 1969 г. Заявлено 10.12.1965.

8. Соколик Л.И. Об измерительном элементе дифференциально-фазной защиты трансформаторов. "Известия вузов. Энергетика", 1969, № 11.

9. Новаш В.И., Тимечкин А.А., Соколик Л.И. Исследование на АБМ фильтровых органов дифференциальных защит трансформаторов и блоков генератор-трансформатор. "Известия вузов. Энергетика", 1969, № 12.

10. Соколик Л.И., Сопьяник В.Х. Дифференциально-фазная защита блока генератор-трансформатор с применением полупроводников. Материалы к XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. (Тезисы докладов). Минск, 1970.

11. Варважня В.И., Соколик Л.И., Горбарук Т.Д. Совершенствование схем и характеристик дифференциально-фазной защиты

шин. В сб. "Экспериментальные и наладочные работы предприятия "Белорусэнергонадка". Минск, "Полымя", 1970.

12. Новаш В.И., Тивечкин А.А., Соколик Л.И. Исследование на АВМ некоторых элементов дифференциально-фазных защит. Тезисы докладов 3 республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

13. Соколик Л.И. Фильтр симметричных составляющих. Авт. свид. СССР № 279821. МПК H03H 3/00; H02H 1/00. Опубликовано 26.08.1970. Бюллетень № 27. Заявлено 18.03.1968.

14. Соколик Л.И. Способ выполнения дифференциальной защиты. Авт. свид. СССР № 301777. МПК 2 H02H 3/28. Опубликовано 21.04.1971. Бюллетень № 14. Заявлено 18.07.1969.