

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЕЙ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

При коротких замыканиях выбор поврежденных фаз всегда предшествует определению места повреждения. Для выбора поврежденной фазы широко используются фильтровые избиратели поврежденной фазы, использующие симметричные составляющие фазных токов. В сетях с изолированной нейтралью фазные токи при замыкании на землю определяются в основном токами нагрузки, и в большинстве случаев фазный ток поврежденной фазы мало отличается от токов в неповрежденных фазах. Поэтому фазные токи и их симметричные составляющие для выбора поврежденной фазы при однофазных замыканиях не используются. Для выбора поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью используются свойства модулей фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали. Однофазные замыкания на землю происходят, как правило, через переходные сопротивления, значения которых могут достигать несколько тысяч Ом. Поэтому исследование избирателей поврежденной фазы, использующих модули напряжений, при однофазных замыканиях и при замыканиях через значительные переходные сопротивления, является актуальной задачей.

Цель статьи — исследовать свойства и рассмотреть направления совершенствования избирателей поврежденной фазы, использующих модули фазных напряжений, определить области их селективного действия в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания. Описать алгоритмы, при которых избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

**Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, избиратели поврежденной фазы, переходное сопротивление.

**Введение.** В сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ избиратели поврежденной фазы (ИПФ) при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) используются совместно с устройствами контроля изоляции [1] и устройствами по определению места замыкания по параметрам аварийного режима [2, 3]. Поврежденная фаза при контроле изоляции определяется, как правило, по трем вольтметрам, включенным во вторичную обмотку трансформатора напряжения. В электрических сетях карьеров, угольных разрезов и шахт с изолированной нейтралью выбор поврежденной фазы при ОЗЗ используется для защитного шунтирования поврежденной фазы и для гашения дуги в месте замыкания. Такое шунтирование применяется с целью обеспечения электробезопасности путем снижения тока, протекающего через тело человека, попавшего под напряжение [4]. При возникновении замыкания ИПФ определяет поврежденную фазу. Поврежденная фаза заземляется на небольшой промежуток времени и затем дешунтируется. За время шунтирования дуга в месте замыкания гаснет, а в случае прикосновения человека к токоведущей части до шунтирования он успевает за время шунтирования освободиться от прикосновения. В некоторых стра-

нах защитное шунтирование применяется и в сетях напряжением 6,10 кВ [5].

При коротких замыканиях выбор поврежденных фаз всегда предшествует реализации функции определения места повреждения, в том числе и при использовании технологий современных «цифровых» электрических сетей [6, 7]. В сетях напряжением 110 кВ избиратели используются для выбора поврежденных фаз при несимметричных коротких замыканиях [8–10]. Для выбора поврежденной фазы широко используются фильтровые ИПФ, использующие симметричные составляющие фазных токов [11–13]. При однофазных коротких замыканиях векторы симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе совпадают по направлению и угол между их векторами равен нулю, в то время как в неповрежденных фазах вектор тока нулевой последовательности составляет с векторами токов обратной последовательности углы  $120^\circ$  или  $240^\circ$  [13–15]. Таким же свойством обладают векторы токов обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [16]. От фазных токов нагрузки аварийные составляющие обратной и нулевой

последовательности не зависят, поэтому и работа фильтровых ИПФ не зависит от токов нагрузки. Это главное достоинство фильтровых избирателей. Другим достоинством использования симметричных составляющих токов является независимость условий срабатывания фильтровых ИПФ от переходных сопротивлений в месте повреждения. Однако в сетях с изолированной нейтралью фазные токи при замыкании на землю определяются в основном токами нагрузки, и в большинстве случаев фазный ток поврежденной фазы мало отличается от токов в неповрежденных фазах. Поэтому фазные токи и их симметричные составляющие для выбора поврежденной фазы при ОЗЗ не используются. Для выбора поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью используются свойства фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали.

В статье рассмотрены алгоритмы избирателей поврежденной фазы, основанные на использовании действующих значений (модулей) фазных напряжений. Выполнен аналитический обзор избирателей, предложены пути их совершенствования, определены области селективного действия в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания.

**Метод исследования.** Для исследования ИПФ используются графики изменения фазных напряжений в функции переходного сопротивления. Переходное сопротивление при ОЗЗ может достигать нескольких тысяч Ом, поэтому графики строят либо в логарифмическом масштабе [17], либо вводится промежуточная переменная, зависящая от переходного сопротивления. В качестве такой переменной в [18] принят угол  $\alpha$ , на который напряжение нейтрали относительно земли  $U_{N3}$  отстает от напряжения поврежденной фазы относительно нейтрали  $U_{AN}$ , взятого с противоположным знаком. Графики изменения фазных напряжений  $U_{A'}$ ,  $U_{B'}$ ,  $U_{C'}$  и смещения нейтрали  $U_N$  в функции угла  $\alpha$  в относительных единицах приведены на рис. 1. Для исследования алгоритмов избирателей поврежденной фазы была реализована модель сети и устройств, реализующих эти алгоритмы в программном комплексе MATLAB Simulink.

Графики на рис. 1 построены в относительных единицах для отношений фазных напряжений при ОЗЗ к фазному напряжению в нормальном рабочем режиме  $U_\phi$ . В нормальном режиме, когда  $\alpha = 90^\circ$ , все фазные напряжения на рис. 1 равны единице. При металлическом замыкании (при  $R_{\Gamma} = 0$  и  $\alpha = 0^\circ$ ) напряжение поврежденной фазы снижается до нуля, а напряжения неповрежденных фаз увеличиваются в 1,73 раза.

Угол  $\alpha$  зависит от величины переходного сопротивления. Поэтому на ось углов  $\alpha$  на рис. 1 нанесена ось переходных сопротивлений  $R_{\Gamma}$ . На рис. 1 отмечены три значения переходного сопротивления  $R_{\Gamma1}$ ,  $R_{\Gamma2}$  и  $R_{\Gamma3}$ , важные для анализа алгоритмов ИПФ. При сопротивлении  $R_{\Gamma2}$  напряжение неповрежденной фазы  $B$  ( $U_B$  на рис. 1) снижается до значения напряжения поврежденной фазы (фазы  $A$ ). В точке пересечения графиков напряжений  $U_A$  и  $U_B$  фазные напряжения равны между собой и равны 0,87. При сопротивлении  $R_{\Gamma3}$  напряжение неповрежденной фазы « $B$ » достигает минимально возможного значения и при дальнейшем росте переходного сопротивления напряжение неповрежденной фазы « $B$ » начинает увеличиваться. Минимально возможное значение напряжения неповрежденной фазы равно 0,82. При переходном сопротивлении  $R_{\Gamma1}$  напряже-

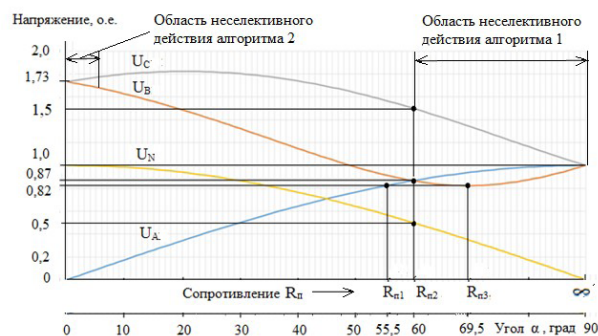


Рис. 1. Графики изменения напряжений в функции переходного сопротивления

ние поврежденной фазы  $A$  снижается до минимально возможного значения неповрежденной фазы  $B$ , равного 0,82. Значения переходных сопротивлений  $R_{\Gamma1}$ ,  $R_{\Gamma2}$  и  $R_{\Gamma3}$  зависят от величины тока замыкания на землю. Так, в сети 10 кВ сопротивление  $R_{\Gamma2}$  может быть от нескольких сотен Ом при токе замыкания 10 А до нескольких тысяч Ом при токе 1 А [18]. Так как при замыкании на землю через деревянные части конструкции или при падении провода на сухой грунт переходные сопротивления могут быть до 5–7 кОм [19], то при анализе ИПФ необходимо учитывать ОЗЗ через сопротивления  $R_{\Gamma1}$ ,  $R_{\Gamma2}$  и  $R_{\Gamma3}$ .

**Способы выбора поврежденной фазы и их анализ.** В основе алгоритмов выбора поврежденной фазы при использовании модулей напряжений лежат два признака поврежденной фазы: поврежденной является фаза с наименьшим значением фазного напряжения, и поврежденной является фаза, отстающая от фазы с наибольшим значением фазного напряжения. Критерий выбора поврежденной фазы по наименьшему из фазных напряжений с использованием математических символов при замыкании на землю фазы  $A$  записывается в виде:

$$U_A = U_{\min} \in U_\phi \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_A. \quad (1)$$

Критерий (1) означает: если напряжение  $U_A$  является наименьшим из фазных напряжений  $U_\phi$ , то выходным напряжением ИПФ является напряжение  $U_A$  и поврежденной является фаза  $A$ .

При замыкании на землю фазы  $A$  наибольшее напряжение будет у фазы  $C$ . При этом критерий выбора поврежденной фазы по наибольшему из фазных напряжений с использованием математических символов записывается в виде:

$$U_C = U_{\max} \in U_\phi \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_A. \quad (2)$$

Критерий (2) означает: если напряжение  $U_C$  является наибольшим из фазных напряжений  $U_\phi$ , то выходным напряжением ИПФ является напряжение  $U_A$  отстающей фазы и поврежденной является фаза  $A$  [20].

Как следует из рис. 1, избиратель с алгоритмом (1) селективно работает при переходных сопротивлениях от нуля до значения  $R_{\Gamma2}$ . При ОЗЗ через переходное сопротивление больше значения  $R_{\Gamma2}$  наименьшим из фазных напряжений становится напряжение неповрежденной фазы, отстающей по отношению к поврежденной, и ИПФ с алгоритмом (1) теряет селективность. То есть ИПФ с алгоритмом (1) имеет ограниченную чувствительность к замыканию на землю через переходное сопротивление.

В соответствии с рис. 1 при замыкании на землю фазы А наибольшее фазное напряжение будет в фазе С при всех возможных значениях переходного сопротивления. Однако при металлическом замыкании фазные напряжения двух неповрежденных фаз равны между собой и ИПФ с алгоритмом (2) теряет селективность, так как может выбрать отстающую неповрежденную фазу вместо опережающей.

Таким образом, алгоритмы (1) и (2) не могут обеспечить селективный выбор поврежденной фазы во всем диапазоне изменения переходных сопротивлений. Одно из направлений улучшения свойств ИПФ, основанных на свойствах модулей фазных напряжений, — использовать в алгоритме не одно фазное напряжение, а два или все три. Другое направление совершенствования ИПФ — совместное использование алгоритмов (1) и (2), объединенных дополнительными условиями. Рассмотрим оба направления совершенствования ИПФ.

Для повышения селективности и чувствительности к ОЗЗ через переходное сопротивление избирателей с алгоритмом (1) в [21] было предложено использовать векторную разность фазного напряжения относительно нейтрали  $U_{AN}$  и напряжения смещения нейтрали  $U_{N3}$ . Для измерения фазного напряжения относительно нейтрали используется искусственно созданная нулевая точка. Для исполнительного органа фазы А разность напряжений записывается в виде:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N3}. \quad (3)$$

Исполнительный орган выбирает наибольшее из разностных напряжений, записанных по (3) для фаз А, В и С. Векторные диаграммы выходных напряжений ИПФ  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$  и  $U_{C0}$  для фаз А, В и С по выражению (3) приведены на рис. 2. С использованием математических символов критерий выбора поврежденной фазы при использовании разности фазных напряжений  $U_{\phi 0}$  записывается в виде:

$$|\dot{U}_{A0}| = U_{max} \in U_{\phi 0} \Rightarrow U_{ввх} = U_{A0}. \quad (4)$$

Критерий по выражению (4) означает: если напряжение  $U_{A0}$  является наибольшим из разностных напряжений  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$  и  $U_{C0}$ , входящих во множество  $U_{\phi 0}$ , то выходным напряжением устройства является напряжение  $U_{A0}$  и поврежденной является фаза А.

При малых переходных сопротивлениях разностное напряжение  $U_{A0}$  поврежденной фазы А по (3) наибольшее. Однако при замыкании на землю через переходное сопротивление, равное граничному значению  $R_{\Gamma 2'}$ , разностное напряжение  $U_{A0}$  для поврежденной фазы А становится равным разностному напряжению  $U_{B0}$  для отстающей фазы В (рис. 2б). А при переходных сопротивлениях больше значения  $R_{\Gamma 2'}$ , напряжение  $U_{B0}$  становится больше напряжения  $U_{A0}$  и в качестве поврежденной будет выбрана неповрежденная фаза В. То есть алгоритм (4) имеет тот же недостаток, что и алгоритм (1). Другим недостатком ИПФ по алгоритму (4) является необходимость создания искусственной нулевой точки (нейтрали).

Для обеспечения селективности ИПФ по алгоритму (2) при металлических замыканиях в [22] было предложено использовать разность действующих значений двух фазных напряжений. Для этого из фазного напряжения одной из фаз вычитается

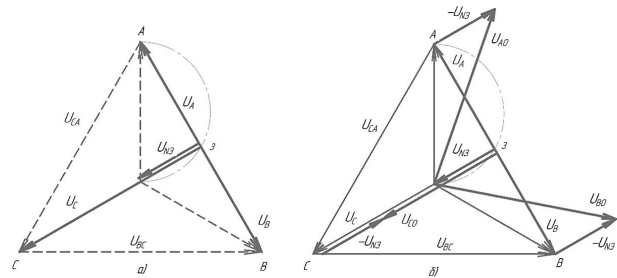


Рис. 2. Векторные диаграммы при  $R_{\Gamma} = R_{\Gamma 2}$  для фазных напряжений (а) и напряжений по уравнению (3) (б)

напряжение отстающей фазы. Всего составляются три разности:  $U_C - U_A$ ,  $U_A - U_B$  и  $U_B - U_C$ . В случае замыкания на землю фазы А рабочей является разность:

$$\Delta U(A) = U_C - U_A > 0, \quad (5)$$

где  $U_A$  — напряжение замкнувшейся фазы;  $U_C$  — напряжение на опережающей по отношению к ней фазе.

Для фазы В рабочей является разность  $\Delta U(B) = U_A - U_B$  и для фазы С разность  $\Delta U(C) = U_B - U_C$ . Исполнительный орган фазы А срабатывает при положительной разнице напряжений по (5). С использованием математических символов критерий выбора поврежденной фазы при замыкании на землю фазы А записывается в виде:

$$\Delta U(A) \in \Delta U(\Phi) > 0 \Rightarrow U_{ввх} = \Delta U(A). \quad (6)$$

Критерий (6) означает: если напряжение  $\Delta U(A)$  в множестве разностных напряжений  $\Delta U(\Phi)$  является положительным, то выходным напряжением устройства является напряжение  $\Delta U(A)$  и поврежденной является фаза А.

Однако ИПФ по (6) также имеет ограниченную чувствительность к переходным сопротивлениям. Из рис. 1 видно, что при замыкании на землю фазы А разностное напряжение  $\Delta U(A)$  по (5) положительное и положительный сигнал на выходе ИПФ присутствует при любом переходном сопротивлении, в том числе и при металлическом замыкании. Однако при переходном сопротивлении больше значения  $R_{\Gamma 2'}$ , напряжение на поврежденной фазе А становится больше напряжения на отстающей фазе В и положительным становится также разностное напряжение фазы В:

$$\Delta U(B) = U_A - U_B > 0.$$

При этом избиратель по (6) вместо поврежденной фазы А может выбрать неповрежденную фазу В и, значит, теряет селективность.

Таким образом, замыкания на землю фазы А через большое переходное сопротивление ведут к ложному срабатыванию ИПФ по алгоритмам (1), (4) и (6) в неповрежденной фазе В. При этом чувствительность всех трех видов ИПФ ограничивается условием несрабатывания на последующей (здоровой) фазе. Область селективной работы всех трех видов избирателей ограничивается значением переходного сопротивления в диапазоне от нуля до  $R_{\Gamma 2'}$ .

Рассмотрим алгоритм выбора поврежденной фазы, способный работать в более широком диапазоне переходных сопротивлений.

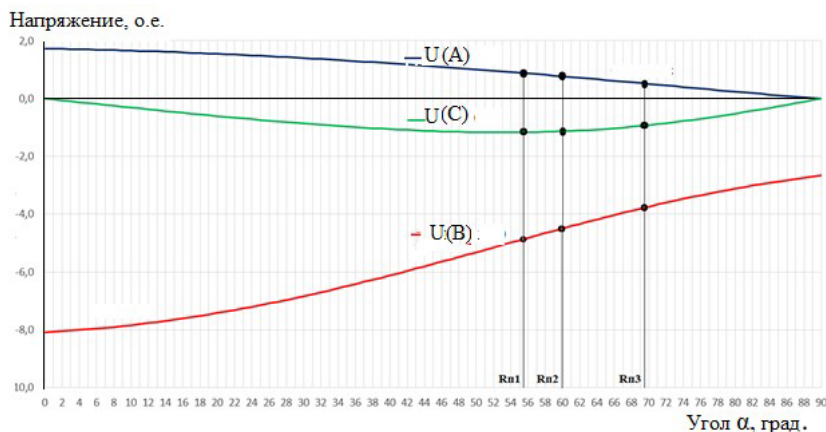


Рис. 3. Графики напряжений по (9) при замыкании на землю фазы А

В [23] был предложен критерий выбора поврежденной фазы для устройств защитного шунтирования, основанный на использовании разности напряжения опережающей фазы и суммы напряжения нулевой последовательности с напряжениями двух других фаз.

Уравнения для выходных напряжений ИПФ записываются в виде:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}(A) &= K_1 U_C - (K_2 U_A + K_3 U_B + K_4 U_0); \\ U_{\text{ВЫХ}}(B) &= K_1 U_A - (K_2 U_B + K_3 U_C + K_4 U_0); \\ U_{\text{ВЫХ}}(C) &= K_1 U_B - (K_2 U_C + K_3 U_A + K_4 U_0), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  — модули напряжений фаз А, В и С;  $U_0$  — модуль напряжения нулевой последовательности;  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  — коэффициенты, пропорциональности.

Коэффициенты  $K_1 - K_4$  выбираются так, чтобы выходное напряжение было больше напряжения срабатывания на выходе избирателя только той фазы, в которой произошло замыкание на землю. При этом условие срабатывания ИПФ можно записать в виде:

$$U(A) \in U(\Phi) > U_{\text{CP}} \Rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = U(A), \quad (8)$$

где  $U_{\text{CP}}$  — напряжение срабатывания.

Выходное напряжение для двух других (неповрежденных) фаз должно быть меньше напряжения срабатывания. Коэффициенты  $K_1 - K_4$  определяются из уравнений (7), записанных для режимов работы электрической сети, в которых известны значения фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности.

Коэффициенты могут быть подобраны так, что ИПФ с алгоритмом (8) будет охватывать весь диапазон переходных сопротивлений и чувствительность ИПФ будет ограничена только значением напряжения срабатывания. При коэффициентах по [24]

$$K_1 = 5/3; K_2 = 4/3; K_3 = 1/3; K_4 = \sqrt{3}/3.$$

Выражения (7) для выходных напряжений ИПФ преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} U(A) &= (5/3)U_C - (4/3)U_A - (1/3)U_B - (\sqrt{3}/3)U_0; \\ U(B) &= (5/3)U_A - (4/3)U_B - (1/3)U_C - (\sqrt{3}/3)U_0; \\ U(C) &= (5/3)U_B - (4/3)U_C - (1/3)U_A - (\sqrt{3}/3)U_0. \end{aligned} \quad (9)$$

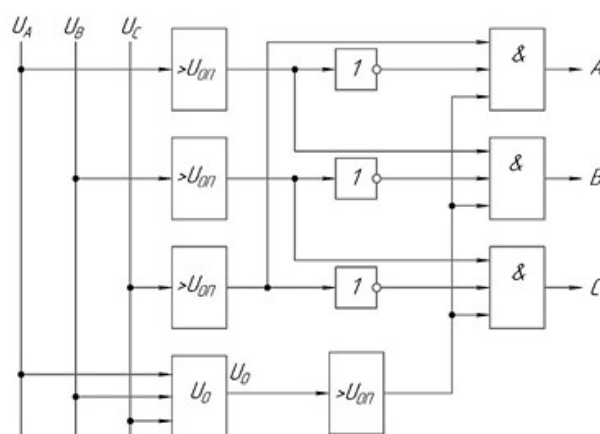


Рис. 4. Структурная схема ИПФ с объединением двух алгоритмов

Графики выходных напряжений по (9) приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что выходное напряжение  $U(A)$  поврежденной фазы при любом значении переходного сопротивления больше нуля и при напряжении срабатывания  $U_{\text{CP}} = 0$  ИПФ с уравнениями выходных напряжений по (9) будет селективно работать во всем диапазоне переходных сопротивлений.

Другое направление улучшения свойств ИПФ, основанных на свойствах модулей фазных напряжений, — совместное использование алгоритмов (1) и (2). На рис. 1 показаны области неселективного действия алгоритмов (1) и (2). Область неселективного действия алгоритма (1) — это ОЗЗ через переходное сопротивление больше граничного значения  $R_{\text{ПЗ}}$ . Область селективного действия алгоритма (2) — это область при малых значениях переходного сопротивления, при которых два наибольших фазных напряжения близки к 1,73. Но объединить алгоритмы (1) и (2) через логическую схему «ИЛИ» нельзя, так как в этом случае сохраняются области неселективного действия каждого из алгоритмов. Для улучшения свойств ИПФ, основанных на объединении алгоритмов (1) и (2), необходимо использовать дополнительные условия, блокирующие работу каждого из алгоритмов в области, где возможна потеря их селективности. Запрет работы алгоритма (2) в области малых переходных сопротивлений может быть выполнен от блока измерения фазных напря-

жений [25, 26]. Для этого вместо определения фазы с наибольшим и фазы с наименьшим фазным напряжением определяются фазы, в которых фазное напряжение больше опорного напряжения, и фазы, в которых напряжение меньше опорного. Структурная схема, поясняющая принцип блокировки в таком ИПФ, приведена на рис. 4. Каждое из фазных напряжений в блоке сравнения сравнивается с опорным напряжением  $U_{оп}$ , в качестве которого может быть принято фазное напряжение предаварийного режима. Если фазное напряжение одной или двух неповрежденных фаз больше опорного, то на выходе соответствующего блока сравнения формируется единичный сигнал, который поступает на вход логической схемы «И» отстающей фазы. Если отстающая фаза является поврежденной, то ее напряжение меньше опорного и на выходе схемы «НЕ» и входе схемы «И» этой фазы отсутствует запрещающий сигнал. При этом в случае наличия единичного сигнала на выходе блока сравнения напряжения нулевой последовательности с опорным напряжением ИПФ срабатывает и правильно определяет поврежденную фазу. Если же отстающая фаза является неповрежденной, то на выходе ее блока сравнения сигнала нет и на выходе схемы «НЕ» формируется сигнал запрета, который блокирует работу выходной схемы «И». Такой ИПФ работает селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление, в том числе и при значениях  $RP_1$ ,  $RP_2$  и  $RP_3$ .

Блокирование работы алгоритмов (1) или (2) в области, где возможна потеря их селективности, можно выполнять с помощью дополнительных условий. Для формирования дополнительных условий можно использовать либо значение напряжения фазы с наименьшим фазным напряжением, либо значение напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением, либо значение напряжения нулевой последовательности [18, 27]. При использовании минимально возможного фазного напряжения неповрежденной фазы в алгоритм (1) вводится условие: напряжение фазы с наименьшим значением фазного напряжения должно быть меньше минимально возможного напряжения неповрежденной фазы:

$$U_{\phi, \min} < UR_{пл}, \quad (10)$$

где  $U_{\phi, \min}$  — наименьшее из фазных напряжений;  $UR_{пл}$  — минимально возможное фазное напряжение неповрежденной фазы.

Таблица 1

Параметры сети

Параметры сети	Модель
Номинальное напряжение, кВ	6
Тип линий	Кабельные
Суммарная протяженность линий сети, км	40
Протяженность испытываемой линии, км	5
Суммарный емкостный ток сети, А	19,4

Минимально возможное напряжение неповрежденной фазы имеет место при переходном сопротивлении  $RP_3$  и равно 0,82 (рис. 1). Поэтому если для фазы с наименьшим напряжением выполняется условие (10), то это может быть только поврежденная фаза. Таким образом, если выполняется условие (10), то поврежденная фаза выбирается по алгоритму (1). Если условие (10) не выполняется, то должен действовать алгоритм (2).

Использование для дополнительных условий напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением или напряжения нулевой последовательности основано на том, что алгоритм (1) действует селективно при переходных сопротивлениях меньше  $RP_2$ . Из рис. 1 видно, что при переходном сопротивлении  $RP_2$  напряжение нулевой последовательности равно 0,5, а напряжение фазы с наибольшим фазным напряжением равно 1,5. Следовательно, если напряжение нулевой последовательности больше 0,5 или напряжение фазы с наибольшим фазным напряжением больше 1,5, то алгоритм (1) действует селективно. При этом для обеспечения селективности алгоритма (1) в условия срабатывания ИПФ достаточно ввести одно из условий:

$$U_{\phi, \max} > 1,5, \quad (11)$$

$$U_0 > 0,5, \quad (12)$$

где  $U_{\phi, \max}$  — напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением;  $U_0$  — напряжение нулевой последовательности.

Если выполняется условие (11) или (12), то поврежденная фаза выбирается по алгоритму (1). Если условия (11) или (12) не выполняются, то действие алгоритма 1 запрещается и должен действовать алгоритм (2).

Таблица 2

Электрические параметры сети при испытаниях

№	Расстояние до ОЗЗ, км	$R_{пер}$ , Ом	$U_{A'}$ , В	$U_{B'}$ , В	$U_{C'}$ , В	$U_{N'}$ , В	Поврежденная фаза
1	0	0	0	$6306e^{-j151c}$	$6306e^{j149c}$	$3642e^{j179c}$	А
2	0	200	$2660e^{j41c}$	$3749e^{-j160c}$	$6060e^{j124c}$	$2459e^{j132c}$	А
3	2,5	316	$3151e^{j28c}$	$3151e^{-j151c}$	$5433e^{j119c}$	$1794e^{j119c}$	А
4	2,5	350	$3225e^{j26c}$	$3085e^{-j148c}$	$5298e^{j118c}$	$1660e^{j116c}$	А
5	5	307	$3151e^{j28c}$	$3151e^{-j151c}$	$5434e^{j119c}$	$1794e^{j119c}$	А
6	5	310	$3157e^{j28c}$	$3144e^{-j151c}$	$5423e^{j119c}$	$1783e^{j194c}$	А

Результаты исследования алгоритмов ИПФ

№	Результаты работы алгоритмов ИПФ.						
	ИПФ по (1)	ИПФ по (2)	ИПФ по (4)	ИПФ по (6)	ИПФ по (8)	ИПФ по рис. 4	ИПФ по (10–12)
1	А	Отказ	А	А	А	А	А
2	А	А	А	А	А	А	А
3	Отказ	А	Отказ	А	А	А	А
4	В	А	В	Отказ	А	А	А
5	Отказ	А	Отказ	А	А	А	А
6	В	А	В	Отказ	А	А	А

Таким образом, при использовании любого из условий (10), (11) или (12) совместно с алгоритмами (1) и (2) избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

**Исследование работы алгоритмов.** Для оценки работы алгоритмов определения поврежденной фазы была разработана модель электрической сети с изолированной нейтралью в программном комплексе Matlab Simulink, параметры которой приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены комплексы фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, полученные на модели при замыканиях в начале, середине и конце контролируемой линии при замыкании в фазе «А».

Результаты исследования алгоритмов ИПФ на модели сети представлены в табл. 3.

Алгоритмы по (1) и (4) правильно выбрали поврежденную фазу «А» только в тех случаях, когда переходное сопротивление было меньше значения  $R_{\text{пл}}$  и модуль фазного напряжения поврежденной фазы был наименьшим. При испытаниях 3 и 5, алгоритмы, в соответствии с теоретическим анализом, отказали, а при испытаниях 4 и 6 ошибочно выбрали фазу «В» вместо фазы «А». Алгоритм по (2) отказал при металлическом замыкании в начале линии, когда напряжения в неповрежденных фазах были равны (испытание 1). В остальных случаях работа алгоритма по (2) была селективной. Алгоритм по (6) отказал при испытаниях 4 и 6, когда разность модулей напряжений по (5) оказалась положительной для двух разностей фазных напряжений.

Наилучшие результаты показали алгоритмы по (8), по рис. 4 и по (10–12), которые действовали селективно при всех испытаниях.

**Заключение.** Выполнен аналитический обзор избирателей поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю, основанных на свойствах модулей фазных напряжений. Для анализа предложено использовать математическое описание алгоритмов ИПФ в обобщенном виде. Исследованы области селективного действия избирателей в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания.

Исследованы алгоритмы, основанные на использовании наименьшего из фазных напряжений (алгоритм 1) или наибольшего из фазных напряжений (алгоритм 2). Показано, что такие алгоритмы, а также алгоритмы, основанные на контроле разности двух фазных напряжений или разности фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, в зависимости от значения переходного сопротивления могут работать неселективно.

Исследован критерий выбора поврежденной фазы, основанный на использовании трех уравнений, записанных для выходных напряжений разных фаз. Выходное напряжение такого избирателя должно быть больше напряжения срабатывания в уравнении только той фазы, в которой произошло замыкание на землю. Показано, что такой избиратель может селективно работать во всем диапазоне переходных сопротивлений, но требует исследований для выбора коэффициентов в уравнениях для выходных напряжений.

Предложены направления совершенствования избирателей поврежденной фазы, основанных на совместном использовании алгоритмов 1 и 2. Описаны алгоритмы, при которых избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

#### Библиографический список

1. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Москва: Высшая школа, 2007. 639 с.
2. Аржанников Е. А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 175 с.
3. Шабанов В. А., Сорокин А. В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1, т. 17. С. 33–43. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-33-43.
4. Шуцкий В. И., Жидков В. О., Ильин Ю. Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 150 с.
5. Гуревич В. И. Некоторые технические аспекты проблемы защиты от замыканий на землю распределительных сетей среднего напряжения // Промышленная энергетика. 2001. № 1. С. 34–37.
6. Мухлынин Н. Д., Ерохин П. М., Паздерин А. В. Направления совершенствования функций релейной защиты за счет использования технологий синхронизированных векторных измерений // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3 (56). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11.
7. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // 2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid, Spain. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755.
8. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. Москва: Высшая школа, 1978. 215 с.
9. Nuthalapati B., Sinha U. K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14 (2). P. 483–489.

10. Yang Yu, Mengshi Li, Tianyao Ji [et al.]. Fault Location Approach for Distribution Network with Dynamic Environment // International Transactions on Electrical Energy System. 2022. Vol. 99. DOI: 10.1155/2022/3065602.
11. Лосев С. Б., Онучин В. А., Плотников В. Г. Фильтровый избирательный орган, реагирующий на соотношение аварийных значений симметричных составляющих // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1988. № 10. С. 57–64.
12. Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Мартынов М. В. [и др.]. Индивидуальная и групповая распознающая способность измерительных органов релейной защиты // Электрические станции. 2019. № 10 (1059). С. 30–35.
13. Dashtdar M., Dashtda M. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019. Vol. 19 (2). P. 38–43. DOI: 10.1515/sbeef-2019-0019.
14. Любарский Д. Р., Мисриханов М. Ш., Саухатас А. С. Определение вида повреждения и поврежденных фаз // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 1–3.
15. Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Маслов А. Н. Распознавание поврежденных фаз и определение места повреждения линии электропередачи при одностороннем наблюдении // Электрические станции. 2022. № 4. С. 48–53. DOI: 10.34831/EP.2022.1089.4.008.
16. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970, 519 с.
17. Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ. Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ // Новости электротехники. 2017. № 4 (106). С. 24–27.
18. Шабанов В. А., Сорокин А. В. Признаки поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 19, № 3-4. С. 89–100. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100.
19. Шалин А. И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (дата обращения: 10.02.2023).
20. Пат. SU 1201945A1 СССР, МПК Н 02 Н 5/12. Устройство для автоматического шунтирования поврежденной фазы в электрической сети с изолированной нейтралью // Рыбальченко Ю. Я., Сантоцкий В. Г., Стасенко Р. Ф. № 3773606; заявл. 23. 07.84; опубл. 30. 12.85. Бюл. № 48.
21. Пат. SU 335763 СССР, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство для определения поврежденной фазы / Микрюков В. И., Шишкин Н. Ф., Шкабер В. В. [и др.]. № 1487097/24-76; заявл. 29. 10.70; опубл. 11. 04.72. Бюл. № 13.
22. Пат. SU 904074 A1 СССР, МПК Н 02 Н 5/12; Н 02 Н 3/16. Устройство для определения поврежденной фазы сети // Антонов В. Ф., Сирота И. М., Назаров В. В. [и др.]. № 2733799; заявл. 07. 03.79; опубл. 07. 02.82. Бюл. № 5.
23. Пат. SU 964554 СССР, МПК G 01 R 31/08; Н 02 Н 3/16. Способ определения поврежденной фазы в электрической сети с изолированной нейтралью // Антонов В. Ф., Ягудаев Б. М., Назаров В. В., Микрюков В. И. [и др.]. № 3256524; заявл. 09. 13.81; опубл. 07. 10.82. Бюл. № 37.
24. Шабанов В. А. Избиратель поврежденной фазы при замыканиях на землю на основе системы уравнений для модулей напряжений // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. VII Международ. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во ООО Научно-инженерный центр Энергодиагностика, 2023. С. 128–135.
25. Пат. SU 469182A1 СССР, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство для защиты от поражения электрическим током в трехфазных сетях с изолированной нейтралью // Коваленко И. И. № 175041524-7; заявл. 22. 02.72; опубл. 30. 04.75. Бюл. № 18.
26. Пат. SU 589659A1 СССР, МПК G 01 R 31/08; Н 02 Н 3/16. Способ распознавания поврежденной фазы в сетях с компенсацией токов однофазного замыкания // Стасенко Р. Ф., Фельдман Н. М., Шишков И. М. № 2037745; заявл. 02. 07.74; опубл. 25. 01.78. Бюл. № 3.
27. Сорокин А. В., Шабанов В. А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 2. С. 52–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62.

**ШАБАНОВ Виталий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ), г. Уфа.

SPIN-код: 6677-1136

AuthorID (РИНЦ): 592405

Адрес для переписки: [vitaliyy123@yandex.ru](mailto:vitaliyy123@yandex.ru)

**СОРОКИН Александр Владимирович**, аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» УГНТУ, г. Уфа.

SPIN-код: 5320-8188

AuthorID (РИНЦ): 860832

Адрес для переписки: [sorokin-a-v@mail.ru](mailto:sorokin-a-v@mail.ru)

#### Для цитирования

Шабанов В. А., Сорокин А. В. Использование модулей фазных напряжений для выбора поврежденной фазы при замыканиях на землю // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 92–100. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023 г.

© В. А. Шабанов, А. В. Сорокин

## THE USE OF PHASE VOLTAGE MODULES TO SELECT THE DAMAGED PHASE IN CASE OF SINGLE-PHASE EARTH FAULTS

In case of short circuits, the selection of damaged phases always precedes the determination of the damage location. To select the damaged phase, filter selector of the damaged phase are widely used, using symmetrical components of phase currents. In networks with an isolated neutral, the phase currents during a ground fault are determined mainly by load currents and in most cases the phase current of the damaged phase differs little from the currents in the undamaged phases. Therefore, phase currents and their symmetrical components are not used to select the damaged phase in single-phase short circuits. To select the damaged phase in networks with an isolated neutral, the properties of the phase voltage modules and the neutral offset voltage are used. Single-phase earth faults occur, as a rule, through fault resistances, the values of which can reach several thousand ohms. Therefore, the study of devices for selecting the damaged phase using voltage modules with single-phase earth faults through significant fault resistances is an urgent task.

The purpose of the article is to investigate the properties and consider the directions of improvement of damaged phase sensors using phase voltage modules, to determine the areas of their selective action depending on the magnitude of the fault resistance at the point of damage. Describe algorithms in which the voter will act selectively both with metal damages and with damages through fault resistance.

**Keywords:** single-phase earth faults, device for selecting the damaged phase, fault resistance.

### References

1. Andreyev V. A. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply system's]. Moscow, 2007. 639 p. (In Russ.).
2. Arzhannikov E. A. Distsionnyy printsip v releynoy zashchite i avtomatike liniy pri zamykaniyakh na zemlyu [Remote principle in relay protection and automation of lines during earth faults]. Moscow, 1985. 175 p. (In Russ.).
3. Shabanov V. A., Sorokin A. V. Algoritmy distantsionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya s ispol'zovaniyem toka nulevoy posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for remote determination of the distance to the single-phase fault location using the zero-sequence current as the reference current] // *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. Electrotechnical and Information Complexes and Systems*. 2021. No. 1, vol. 17. P. 33–43. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-33-43. (In Russ.).
4. Shutskiy V. I., Zhidkov V. O., Il'in Yu. N. Zashchitnoye shuntirovaniye odnofaznykh povrezhdeniy elektroustanovok [Protective shunting of single-phase damages of electrical installations]. Moscow, 1988. 150 p. (In Russ.).
5. Gurevich V. I. Nekotoryye tekhnicheskiye aspekty problemy zashchity ot zamykaniy na zemlyu raspredelitel'nykh setey srednego napryazheniya [Some technical aspects of the problem of earth fault protection of medium voltage distribution networks] // *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*, 2001. No. 1. P. 34–37. (In Russ.).
6. Mukhlynin N. D., Yerokhin P. M., Pazderin A. V. Napravleniya sovershenstvovaniya funktsiy releynoy zashchity za schet ispol'zovaniya tekhnologiy sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [Relay protection improving by means of using PMU technologies] // *Elektrotekhnicheskiye sistemy i kompleksy. Electrical Systems and Complexes*. 2022. No. 3 (56). P. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11. (In Russ.).
7. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // 2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid, Spain. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755. (In Engl.).
8. Fabrikant V. L. Distsionnaya zashchita [Remote protection]. Moscow, 1978. 215 p. (In Russ.).
9. Nuthalapati B., Sinha U. K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14 (2). P. 483–489. (In Engl.).
10. Yang Yu, Mengshi Li, Tianyao Ji [et al.]. Fault Location Approach for Distribution Network with Dynamic Environment // *International Transactions on Electrical Energy System*. 2022. Vol. 99. DOI: 10.1155/2022/3065602. (In Engl.).
11. Losev S. B., Onuchin V. A., Plotnikov V. G. Fil'trovyy izbiratel'nyy organ, reagiruyushchiy na sootnosheniye avariynykh znacheniy simmetrichnykh sostavlyayushchikh [Filter elector body reacting to the ratio of emergency values of symmetrical components] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*. 1988. No. 10. P. 57–64. (In Russ.).



12. Kochetov I. D., Lyamets Yu. Ya., Martynov M. V. [et al.]. Individual'naya i gruppovaya raspoznayushchaya sposobnost' izmeritel'nykh organov releynoy zashchity [Individual and group recognition capability of relay protection measurers] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2019. No. 10. P. 30–35. (In Russ.).
13. Dashtdar M., Dashtda M. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019. Vol 19 (2). P. 38–43. DOI: 10.1515/sbeef-2019-0019. (In Engl.).
14. Lyubarskiy D. R., Misrikhanov M. Sh., Saukhatas A. S. Opredeleniye vida povrezhdeniya i povrezhdennykh faz [Determination of the type of damage and damaged phases] // Vestnik IGEU. *Bulletin ISPEU*. 2006. Issue 4. P. 1–3. (In Russ.).
15. Kochetov I. D., Lyamets Yu. Ya., Maslov A. N. Raspoznavaniye povrezhdennykh faz i opredeleniye mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi pri odnostoronnem nablyudeniі [Recognition of damaged phases and fault location of power transmission line observed on one side] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2022. No. 4. P. 48–53. DOI: 10.34831/EP.2022.1089.4.008. (In Russ.).
16. Ulyanov S. A. Elektromagnitnyye perekhodnyye protsessy v elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transients in electrical systems]. M.: Energiya, 1970. 519 p. (In Russ.).
17. Kuchumov L., Kuznetsov A., Chervochkov D. Perekhodnoye soprotivleniye v meste OZZ. Vliyaniye na rezhimnyye parametry i rabochiye signaly zashchit ot OZZ [Transient resistance at the site of the OZZ. Influence on the operating parameters and operating signals of protection from OZZ] // Novosti ElektroTehnikii. *Electrical Engineering News*. 2017. No. 4 (106). P. 24–27. (In Russ.).
18. Shabanov V. A., Sorokin A. V. Priznaki povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Features of a faulty phase at single phase-to-ground faults] // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy. *Electrical and Information Complexes and Systems*. 2022. Vol. 19, no. 3-4. P. 89–100. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100. (In Russ.).
19. Shalin A. I. Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozniknoveniya i pribory zashchity [Earth faults in 6-35 kV power transmission lines] // Novosti Elektrotekhniki. *Electrical Engineering News*. 2005. No. 1 (31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (accessed: 10.02. 2023). (In Russ.).
20. Patent SU 1201945A1 SSSR, IPC H 02 H 5/12. Ustroystvo dlya avtomaticheskogo shuntirovaniya povrezhdennoy fazy v elektricheskoy seti s izolirovannoy neytral'yu [Device for automatic shutting of faulted phase in isolated neutral system] // Rybalchenko Yu. Ya., Santotskiy V. G., Stasenko R. F. No. 3773606. (In Russ.).
21. Patent SU 335763 SSSR, IPC H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya opredeleniya povrezhdennoy fazy [Device for determining the damaged phase] // Mikryukov V. I., Shishkin N. F., Shkaber V. V. [et al.]. No. 1487097/24-7622. (In Russ.).
22. Patent SU 904074 A1 SSSR, IPC H 02 H 5/12; H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya opredeleniya povrezhdennoy fazy seti [Device for determining damaged network phase] // Antonov V. F., Sirota I. M., Nazarov V. V. [et al.]. No. 2733799. (In Russ.).
23. Patent SU 964554 SSSR, IPC G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Sposob opredeleniya povrezhdennoy fazy v elektricheskoy seti s izolirovannoy neytral'yu [Method of determining damaged phase in electric network with insulated neutral wire] // Antonov V. F., Yagudayev B. M., Nazarov V. V., Mikryukov V. I. [et al.]. No. 3256524. (In Russ.).
24. Shabanov V. A. Voter of the damaged phase in earth faults based on a system of equations for voltage modules // Electric drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises: collection of scientific tr. VII International Scientific and Technical conf. Ufa: Publishing House of LLC Scientific and Engineering Center Energodiagnostika, 2023. P. 128–135. (In Russ.).
25. Patent SU 469182A1 SSSR, IPC. H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya zashchity ot porazheniya elektricheskim tokom v trekhfaznykh setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Device for protection against electric shock in three-phase networks with insulated neutral] // Kovalenko I. I. No. 175041524-7. (In Russ.).
26. Patent SU 589659A1 SSSR, IPC G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Sposob raspoznavaniya povrezhdennoy fazy v setyakh s kompensatsiyey tokov odnofaznogo zamykaniya [A method for recognizing a damaged phase in networks with compensation of single-phase short-circuit currents] // Stasenko R. F., Fel'dman N. M., Shishkov I. M. No. 2037745. (In Russ.).
27. Sorokin A. V., Shabanov V. A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Algorithm for determining the damaged phase during a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral] // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2022. Vol. 18, no. 2. P. 52–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62. (In Russ.).

**SHABANOV Vitaliy Alekseyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technical University (USPTU), Ufa.

SPIN-code: 6677-1136

AuthorID (RSCI): 592405

Correspondence address: [vitaliy123@yandex.ru](mailto:vitaliy123@yandex.ru)

**SOROKIN Aleksandr Vladimirovich**, Graduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, USPTU, Ufa.

SPIN-code: 5320-8188

AuthorID (RSCI): 860832

Correspondence address: [sorokin-a-v@mail.ru](mailto:sorokin-a-v@mail.ru)

#### For citations

Shabanov V. A., Sorokin A. V. The use of phase voltage modules to select the damaged phase in case of single-phase earth faults // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 92–100. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100.

Received March 14, 2023.

© V. A. Shabanov, A. V. Sorokin