

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РЕЛЕ, РЕАГИРУЮЩЕЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ ТРЕУГОЛЬНИКА ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Н. В. ЛИСЕЦКИЙ, А. В. ШМОЙЛОВ

(Томский политехнический институт)

В современных устройствах релейной защиты и автоматики контроль линейных напряжений осуществляется двумя разновидностями схем:

1) схемой с двумя или тремя быстродействующими реле, включенными на линейные напряжения;

2) схемой с фильтр-реле напряжения обратной последовательности и реле, включенным на одно из междуфазных напряжений.

Эти схемы удовлетворяют нужды эксплуатации. Однако изменения напряжений при нарушении нормального режима можно преобразовать с помощью бесконтактного функционального преобразователя, например, утроителя частоты Спинелли. На выход такого преобразователя включить электромагнитное реле последовательно с конденсатором (рис. 1, а) и фиксировать все виды повреждений.

Предлагаемое устройство быстродействующее. Его можно изготовить в двух исполнениях:

1) реагирующим на все виды повреждений, связанные с уменьшением площади треугольника линейных напряжений;

2) чувствительным к обрывам в цепях напряжения и мало чувствительным к повреждениям на защищаемом объекте.

Если реле предназначается для контроля исправности цепей напряжения, то конденсатор исключается из схемы.

Подобное реле, выполненное на индукционной системе, описано в [1]. Это реле предназначалось для блокировки дистанционной защиты при обрывах в цепях напряжения. Оно было медленнодействующим и срабатывало не только при обрывах, но и при повреждениях на защищаемом объекте. В настоящее время такие реле промышленностью не выпускаются.

Однофазные трансформаторы утроителя частоты Спинелли, как известно, работают в режиме насыщенной стали. Поэтому подведенные к утроителю синусоидальные напряжения трансформируются на вторичную сторону в искаженном виде. Напряжения вторичных обмоток складываются и на выводах утроителя получается напряжение, равное геометрической сумме искаженных фазных напряжений.

При трехполюсных металлических замыканиях указанные напряжения симметричны и напряжение на выходе утроителя будет содержать только сумму третьих и кратных ей гармонических составляющих; 1-я, 5-я, 7-я, 11-я и т. д. составляющие, геометрически суммируясь, дают ноль.



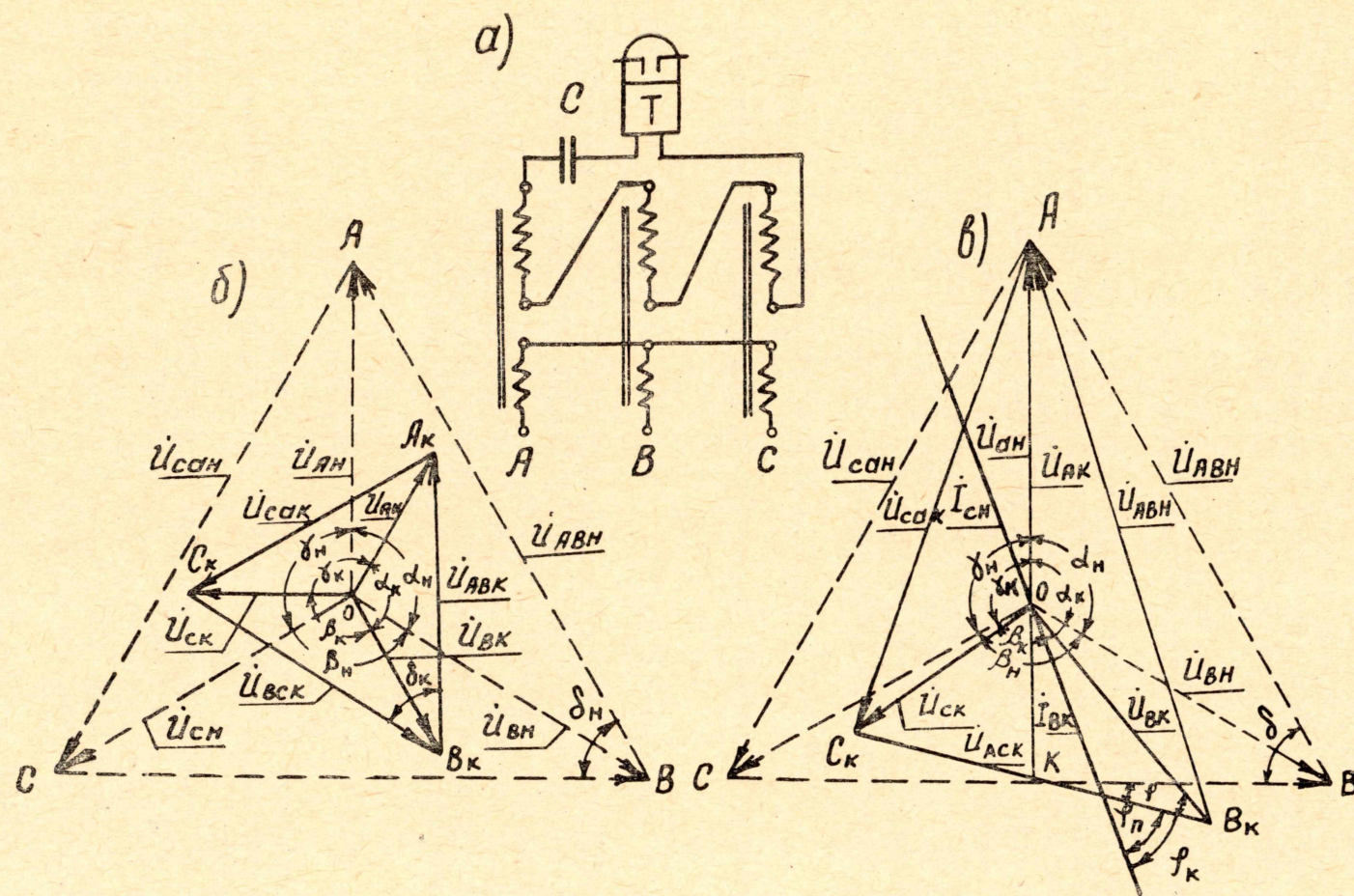


Рис. 1



При несимметричных трехфазных и двухфазных коротких замыканиях подведенные к утроителю напряжения несимметричны. Вследствие этого насыщение стали трансформаторов различных фаз будет неодинаковым, и в напряжении на выходе утроителя, кроме третьей и кратной ей гармонических составляющих, появится напряжение небаланса, представляющее собой геометрическую сумму 1-й, 5-й, 7-й и т. д. гармонических составляющих.

Для того, чтобы установить связь между напряжением на выходе утроителя частоты и площадью треугольника линейных напряжений, проведем анализ работы устройства при различных видах повреждений. При проведении указанного анализа примем следующие допущения:

- 1) утроитель работает на холостом ходу;
- 2) гармонические составляющие, кратные трем, начиная с девятой и выше, не учитываем;
- 3) геометрическую сумму напряжений 1-й, 5-й, 7-й и т. д. гармонических составляющих, возникающих в утроителе при несимметричных замыканиях, будем учитывать напряжением небаланса.

При трехфазном симметричном коротком замыкании площадь треугольника линейных напряжений изменяется от номинальной до нуля в зависимости от электрической удаленности от места замыкания до шин электроустановки. При этом система фазных и линейных векторов остается симметричной (рис. 1, б). Площадь треугольника линейных напряжений, для этого случая, может быть выражена

$$S_{\Delta}^{(3)} = \frac{1}{2} U_{ВСК} U_{АВК} \sin \delta_K = \frac{\sqrt{3}}{4} U_K^2. \quad (1)$$

Напряжение на выходе утроителя частоты для этого случая запишется:

$$\dot{U}_3 = U_3 = \frac{1}{k} (U_{АК} e^{-j3\alpha_K} + U_{АК} e^{j3\gamma_K}) = \frac{\sqrt{3}}{4} U_K, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент трансформации утроителя частоты для третьей гармонической составляющей. По данным [2] и [4] этот коэффициент весьма близок к постоянной величине.

Векторная диаграмма напряжений на шинах при коротком замыкании между фазами В и С на отходящей линии показана на рис. 1в. Площадь треугольника линейных напряжений для этого случая запишется:

$$S_{\Delta}^{(2)} = S_{\Delta АКВ_K} + S_{\Delta АКС_K} = \frac{\sqrt{3}}{4} U_{\text{л}} U_K \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $U_{\text{л}}$  — линейное напряжение нормального режима;

$U_K$  — остаточное напряжение на шинах между замкнувшимися фазами;

$\varphi$  — угол, равный разности углов сопротивления короткого замыкания и сопротивления, отходящего от шин присоединения.

Вектор геометрической суммы третьих гармонических составляющих фазных напряжений на вторичной стороне утроителя частоты можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} U_3 = \frac{1}{k} [ & U_{АК} + U_{ВК} \cos 3\alpha_K + U_{СК} \cos 3\gamma_K + j(U_{СК} \sin 3\gamma_K - \\ & - U_{ВК} \sin 3\alpha_K)] = \frac{1}{k} \{ U_{АК} + U_{ВК}(4\cos\alpha_K - 3\cos\alpha_K) + U_{СК}(4\cos^3\gamma_K - \\ & - 3\cos\gamma_K) + j[U_{СК}(3\sin\gamma_K - 4\sin^3\gamma_K) - U_{ВК}(3\sin\alpha_K - 4\sin^3\alpha_K)] \}. \end{aligned} \quad (4)$$



Из векторной диаграммы рис. 1, а

$$U_{AK} = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}};$$

$$U_{BK} = \sqrt{OK^2 + BK^2 - 2OK \cdot BK \cos(90^\circ + \varphi)} = \sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} + \frac{U_{\pi} \cdot U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi};$$

$$U_{CK} = \sqrt{OK^2 + KB_K^2 - 2OK \cdot KB_K \cos(90^\circ - \varphi)} = \sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} - \frac{U_{\pi} \cdot U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi};$$

$$U_{ABK} = \sqrt{AK^2 + KB_K^2 - 2AK \cdot KB_K \cos(90^\circ + \varphi)} = \sqrt{\frac{2,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} + \frac{\sqrt{3} U_{\pi} U_K \sin \varphi}{2}};$$

$$U_{CAK} = \sqrt{AK^2 + KC_K^2 - 2AK \cdot KC_K \cos(90^\circ - \varphi)} = \sqrt{\frac{2,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} - \frac{\sqrt{3} U_{\pi} U_K \sin \varphi}{2}};$$

$$\alpha_K = \arccos \frac{U_{AK}^2 + U_{BK}^2 - U_{ABK}^2}{2U_{AK} \cdot U_{BK}} = \arccos \frac{-\frac{U_{\pi}}{2\sqrt{3}} - \frac{U_K}{2} \sin \varphi}{\sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} + \frac{U_{\pi} U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi}};$$

$$\gamma_K = \arccos \frac{U_{AK}^2 + U_{CK}^2 - U_{CAK}^2}{2U_{AK} \cdot U_{CK}} = \arccos \frac{-\frac{U_{\pi}}{2\sqrt{3}} + \frac{U_K}{2} \sin \varphi}{\sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} - \frac{U_{\pi} U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi}};$$

$$\alpha_K = \arcsin \frac{\frac{U_K}{2} \cos \varphi}{\sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} + \frac{U_{\pi} U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi}};$$

$$\gamma_K = \arcsin \frac{\frac{U_K}{2} \cos \varphi}{\sqrt{\frac{0,25U_{\pi}^2}{3} + \frac{U_K^2}{4} - \frac{U_{\pi} U_K}{2\sqrt{3}} \sin \varphi}}.$$

Подставив в выражение (4) записанные выше значения, получим

$$U_3 = \frac{U_{\pi} U_K^2 \cos^2 \varphi}{\sqrt{3} k \left[ \left( \frac{U_{\pi}^4}{12} + \frac{U_K^4}{4} \right) - \frac{U_{\pi}^2 U_K^2}{12} \sin^2 \varphi \right]} \left( \frac{U_{\pi}^2}{12} + \frac{U_K^2}{4} \cos 2\varphi - j \frac{U_K^2}{4} \sin 2\varphi \right). \quad (5)$$



Модуль этого вектора

$$|\dot{U}_3| = \frac{4U_L U_K^2 \cos^2 \varphi}{\sqrt{3} k \sqrt{\frac{U_L^4}{9} + \frac{2}{3} U_L^2 U_K^2 \cos 2\varphi + U_K^4}}. \quad (6)$$

Как видно из уравнения (6), при двухфазном металлическом замыкании в непосредственной близости от шин ( $U_K=0$ ) напряжение третьей гармонической составляющей обращается в нуль. Однако полное напряжение не будет равно нулю. В этом случае по одной из первичных обмоток утроителя будет протекать ток, в два раза больший по сравнению с токами в двух других обмотках. Насыщение стали сердечников будет различным и появится напряжение небаланса, представляющее собой геометрическую сумму 1-й, 5-й, 7-й и т. д. гармонических составляющих.

При обрыве одной фазы трансформатора напряжения (например, фазы С) площадь треугольника линейных напряжений будет равна нулю, так как из трех линейных напряжений останется только одно. Напряжение на выходе утроителя частоты также будет равно нулю:

$$U_{AB} = U_L; \quad U_{AO} = \frac{U_L}{2}; \quad U_{BO} = \frac{U_L}{2} e^{-j180^\circ}; \quad U_{CO} = 0.$$

Вектор напряжения третьих гармонических составляющих для этого случая

$$\dot{U}_3 = \frac{1}{k} (U_{AO} + U_{BO} e^{-j3\alpha} + U_{CO} e^{j3\gamma}) = \frac{1}{k_3} \left( \frac{U_L}{2} + \frac{U_L}{2} e^{-j3 \cdot 180^\circ} + 0 \right) = 0.$$

Для пятых гармонических составляющих вектор напряжения запишется:

$$\dot{U}_5 = \frac{1}{k_5} (U_{AO} + U_{BO} e^{-j5\alpha} + U_{CO} e^{j5\gamma}) = \frac{1}{k_5} \left( \frac{U_L}{2} + \frac{U_L}{2} e^{-j5 \cdot 180^\circ} + 0 \right) = 0.$$

Аналогичные уравнения можно записать для всех других гармонических высшего порядка.

Проведенный анализ дал возможность получить параметрические зависимости напряжения холостого хода утроителя частоты от площади треугольника линейных напряжений (1, 2, 3, 6) и от остаточного напряжения между поврежденными фазами (2, 6). На рис. 2, а и б построены эти зависимости в относительных единицах при  $k=1$  и  $\varphi=0$ . При построении за базисную величину принято линейное напряжение нормального режима. Обозначения к кривым на рис. 2: Т — для трехфазного замыкания, Д — для двухфазного. На этом же рисунке приведены экспериментальные кривые:

ТХ и ДХ — для холостого хода утроителя частоты;  
ТР и ДР — при нагрузке утроителя только на реле;  
ТС и ДС — при нагрузке утроителя на последовательно соединенные конденсатор и реле.

В опытах использовался утроитель частоты мощностью 1 ва, реле типа ЭТ-522/0,2 и конденсатор емкостью 15 мкф.

На рис. 3 приведены кривые тока, протекающего через реле, в зависимости от величины остаточного напряжения при тех же условиях.

Форма кривых установившихся напряжений и токов показана на осциллограммах рис. 4 и 5 при отсутствии и наличии конденсатора в цепи реле.



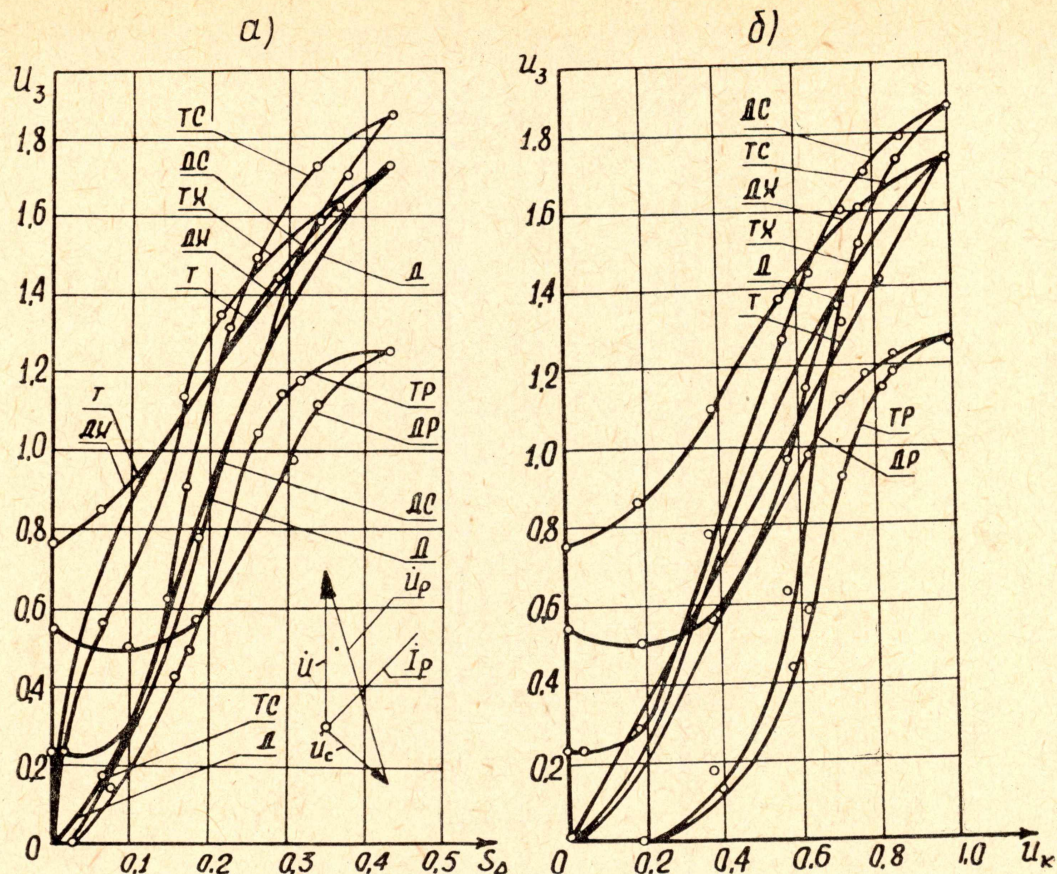


Рис. 2

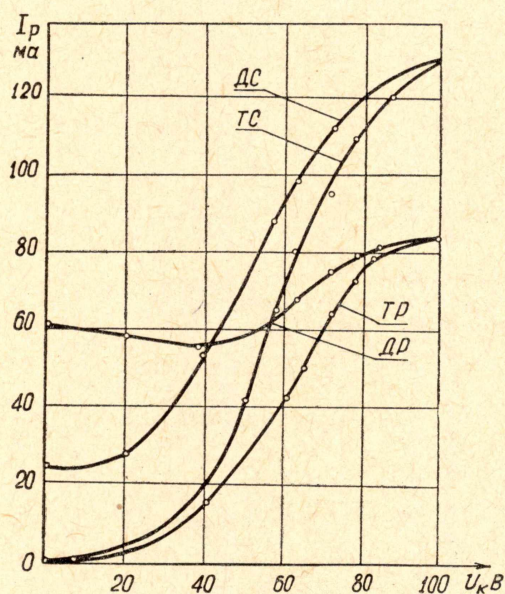


Рис. 3

Сравнивая экспериментальные кривые рис. 2 с теоретическими, можно отметить, что характер их изменения сходен.

Кривые TX при малых остаточных напряжениях располагаются ниже расчетных. Это объясняется слабым насыщением стали трансформаторов утроителя частоты, а следовательно, и слабым искажением формы кривых напряжений во вторичных обмотках.



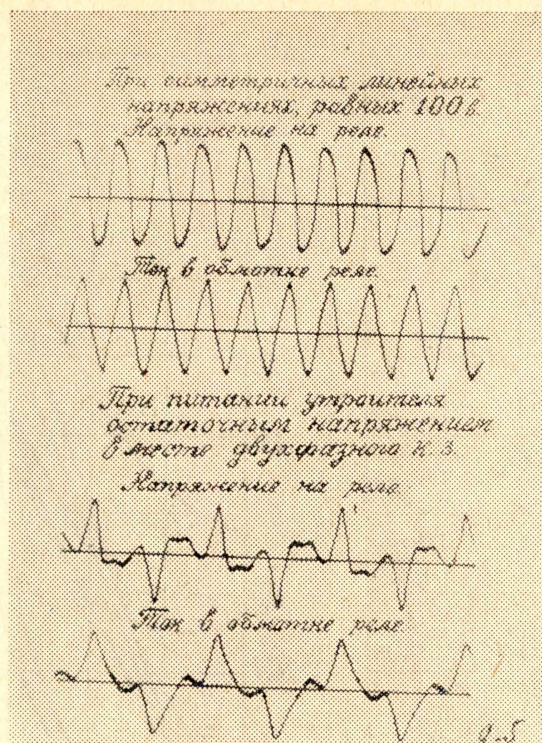


Рис. 4

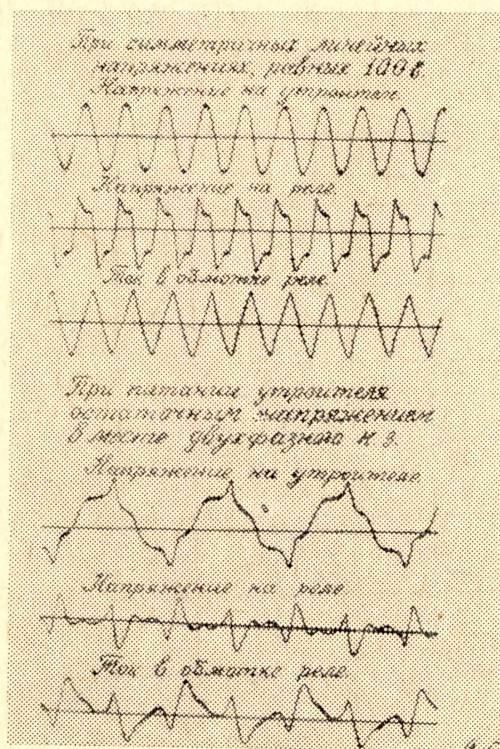


Рис. 5

При больших значениях остаточных напряжений кривые ТХ идут выше расчетных. Это объясняется тем, что действительные напряжения выхода утроителя, кроме третьих гармоник, имеют значительную часть высших гармонических, кратных трем, которые мы не учитывали в теоретических расчетах. Причем при трехфазных симметричных за-



мыканиях все эти высшие гармонические совпадают по фазе с третьей гармоникой.

Кривые ДХ во всем диапазоне располагаются выше расчетных за счет напряжений небаланса, неучтенных выражением (6). Причем при малых остаточных напряжениях в напряжении небаланса преобладают 1-я, 5-я, 7-я и т. д. гармоники, что хорошо видно на рис. 4 и 5. При больших остаточных напряжениях треугольник линейных напряжений становится более симметричным. Поэтому напряжение небаланса за счет 1-й, 5-й, 7-й и т. д. гармонических составляющих уменьшается, но появляются 3-я и другие, кратные ей гармоники, которые делают напряжение на выходе утроителя большим расчетного.

Форма кривых ТР и ДР повторяет форму кривых ТХ и ДХ, причем разница в ординатах представляет собой потерю напряжения в сопротивлениях вторичных обмоток утроителя частоты при протекании через них тока реле.

Кривые ТС и ДС, начиная с остаточного напряжения  $U_K=0,3$  и площади треугольника линейных напряжений  $S_{\Delta}=0,14$ , располагаются выше соответствующих кривых ТР и ДР. Такое увеличение напряжения на реле при включении последовательно с его обмоткой емкости происходит за счет геометрической разности напряжений утроителя частоты ( $U_y$ ) и падения напряжения в емкостном сопротивлении ( $U_C$ ) при протекании по цепи тока реле ( $I_p$ ), что показано на векторной диаграмме рис. 2, а.

При малых остаточных напряжениях кривые ДС располагаются ниже кривых ДР. Это вызвано сглаживанием емкостью пиков напряжения небаланса, что можно проследить по кривым осциллограмм рис. 4 и 5.

Самыми важными зависимостями, по нашему мнению, являются кривые рис. 3. Форма кривых этого рисунка в основном повторяет форму аналогичных кривых рис. 2, б. Это естественно, так как кривые рис. 2, б и 3 связаны между собой соотношением закона Ома. Однако при малых остаточных напряжениях кривая ДР рис. 3 резко отличается от аналогичной кривой рис. 2, б — ток в реле в меньшей мере зависит от величины остаточного напряжения. Объяснить это можно следующим:

При двухфазных металлических замыканиях вблизи от места установки защиты напряжение, подводимое к реле, имеет довольно большую 1-ю гармоническую составляющую (рис. 4). Индуктивное сопротивление цепи для 1-й гармонической составляющей равно  $\omega L$ , а для 3-й —  $3\omega L$ . Поэтому при близких двухфазных замыканиях основной составляющей тока реле является 1-я гармоническая составляющая, для которой сопротивление цепи небольшое (рис. 4). По мере удаления точки короткого замыкания напряжение на выходе утроителя частоты изменяет форму: уменьшается 1-я гармоническая составляющая и увеличивается 3-я. Вследствие этого увеличивается эквивалентное сопротивление цепи реле. Вместе с ростом сопротивления растет и напряжение. Поскольку напряжение на реле растет быстрее, чем сопротивление его цепи, наблюдается некоторый подъем кривой ДР рис. 3.

Как видно из кривых рис. 3, при уставке реле 50 та и меньше и отсутствии в его цепи емкости, реле не будет работать при всех двухфазных и удаленных трехфазных замыканиях и будет четко работать при обрыве вторичных цепей напряжения.

Для выяснения характера изменения токов и напряжений при переходных процессах и времени действия реле были сняты осциллограммы при трехфазном замыкании (рис. 6, а) и двухфазном (рис. 6, б). Указанные осциллограммы снимались при внезапных коротких замыканиях, дающих установившееся остаточное напряжение



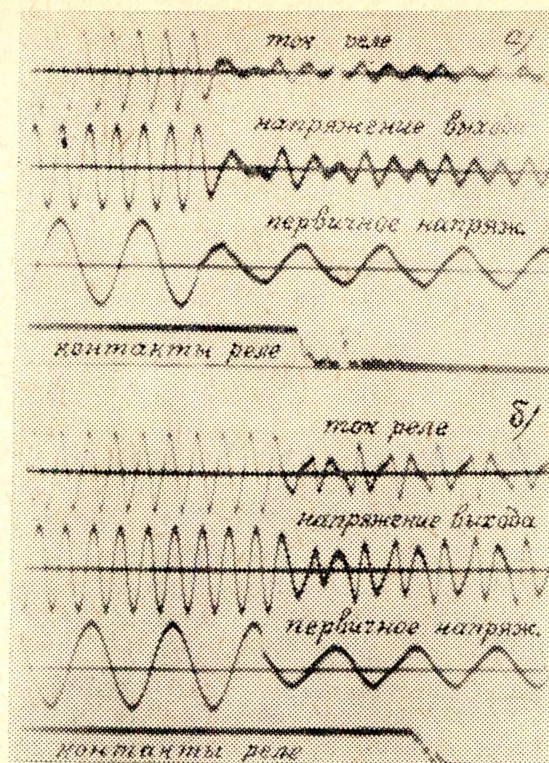


Рис. 6

между поврежденными фазами, равное 67 проц. уставки реле (обеспечивающее коэффициент чувствительности, равный 1,5).

Из приведенных осциллограмм видно, что, несмотря на наличие емкости в цепи реле, изменение напряжений и токов при переходных процессах имеет быстро затухающий характер. Реле надежно замыкает свои контакты при трехфазных замыканиях через 1,5 периода и при двухфазных через 2,5 периода тока промышленной частоты. При более низких остаточных напряжениях быстродействие реле увеличивается.

Кроме указанных выше испытаний, предлагаемое реле включалось на остаточные напряжения при однофазных и двухфазных замыканиях на землю. При однофазных замыканиях реле не работало. При двухфазных замыканиях на землю работало с меньшим запасом по чувствительности по сравнению с двухфазным металлическим замыканием.

### Выводы

1. Предлагаемое реле может быть выполнено в двух вариантах, то есть:

а) действующим при всех видах повреждений, связанных с уменьшением площади треугольника линейных напряжений;

б) действующим только при обрыве во вторичных цепях напряжения и близких трехполюсных коротких замыканиях и недействующим при всех других повреждениях.

2. Все существующие устройства контроля исправности вторичных цепей трансформаторов напряжения могут ложно работать при близких двухфазных коротких замыканиях, предлагаемое реле лишено этого недостатка.

3. Устроитель частоты мощностью 1 ва и конденсатор могут быть



вмонтированы в корпус реле, тогда одним реле заменяется целая схема контроля напряжений.

4. В качестве реагирующего органа устройства, контролирующего линейные напряжения, может быть использовано не только реле типа ЭТ-522/0,2, но и любое другое. Применением реле с меньшей потребляемой мощностью можно снизить мощность утроителя частоты и мощность, потребляемую от трансформатора напряжения, до величины меньшей 1 *ва*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Костров, И. И. Соловьев, А. М. Федосеев. Основы техники релейной защиты. ГЭИ, 1944.
2. А. М. Бамдас, В. А. Кулинич, С. В. Шапиро. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. ГЭИ, 1961.
3. А. М. Федосеев. Основы релейной защиты. ГЭИ, 1961.
4. Л. Н. Бессонов. Электрические цепи со сталью. ГЭИ, 1948.