

С. А. ШАХБАЗЯН

К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ВИДОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Предложен метод расчета несимметричных к.з., основанный на использовании принципа наложения с представлением собственно аварийной схемы в виде продольной несимметрии с разрывом одной или двух фаз. Приведены расчетные выражения с целью определения токов и напряжений для многократных несимметричных к.з. в различных точках сети.

Ключевые слова: электродвижущая сила (ЭДС), короткое замыкание (к.з.), метод наложения, прямая последовательность.

При расчетах несимметричных режимов в электрических сетях использование метода наложения часто облегчает решение задачи [1].

Одним из возможных путей практического использования метода наложения является предлагаемый ниже способ, основанный на наложении симметричного доаварийного режима на несимметричный аварийный режим. При этом задача сводится к представлению собственно аварийной схемы пассивной цепью, в которой в точке к.з. приложен заданный симметричный трехфазный источник ЭДС с разрывом одной или двух фаз, в зависимости от вида несимметричного к.з. [2].

Задача легко решается с помощью системы контурных уравнений отдельных последовательностей и уравнений, выражающих граничные условия для данного вида продольной несимметрии. Это позволяет в определенной степени упростить расчеты сложных видов несимметричных к.з. - одновременных к.з. в двух различных точках системы.

Рассмотрим предлагаемый способ решения на конкретных видах сложных несимметричных к.з.

ДВОЙНЫЕ К.З. В СЕТИ С МАЛЫМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Замыкание на землю фазы А в точках М и N. Исходная схема собственно аварийного режима приведена на рис 1. Здесь Z_c , $Z_{нар}$, Z_{MN} – соответственно сопротивления системы, нагрузки и участка сети между точками М и N, полученные после преобразования исходной схемы сети; \dot{U}_{A_M} , \dot{U}_{B_M} , \dot{U}_{C_M} и \dot{U}_{A_N} , \dot{U}_{B_N} , \dot{U}_{C_N} - трехфазные системы ЭДС, соответствующие напряжениям доаварийного режима в точках М и N.

Токи и напряжения доаварийного режима считаются известными. Токи собственно аварийного режима определяются по схеме продольной

несимметрии с разрывом в фазах В и С, как показано на рис.1. Для этой схемы запишем граничные условия для точек М и N:

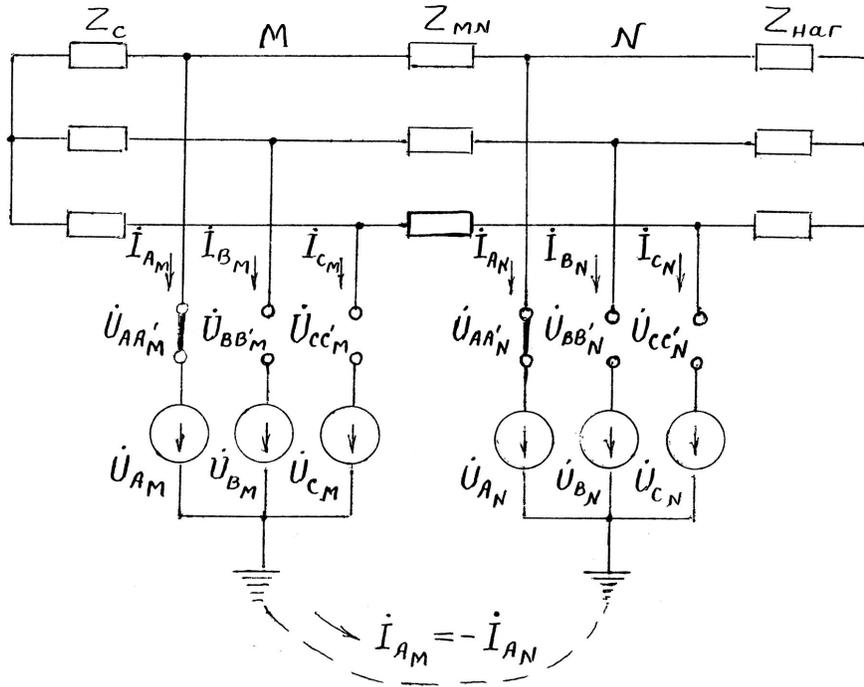


Рис.1. Собственно аварийная схема при замыкании на землю фазы А в двух точках

$$\begin{aligned} U_{AA_M} &= 0; \quad I_{B_M} = 0; \quad I_{C_M} = 0; \\ U_{AA_N} &= 0; \quad I_{B_N} = 0; \quad I_{C_M} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и дополнительное условие:

$$I_{A_M} = -I_{A_N} \quad (2)$$

Из (1) и (2) получаем для составляющих токов и напряжений фазы А в точках М и N:

$$I_{M1} = I_{M2} = I_{M0} = \frac{1}{3} I_{A_M}; \quad I_{N1} = I_{N2} = I_{N0} = \frac{1}{3} I_{A_N}; \quad I_{M1} = -I_{N1}; \quad (3)$$

$$\dot{U}_{M1} = -(\dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0}); \quad \dot{U}_{N1} = -(\dot{U}_{N2} + \dot{U}_{N0}). \quad (4)$$

Расчетные схемы замещения приведены на рис 2.

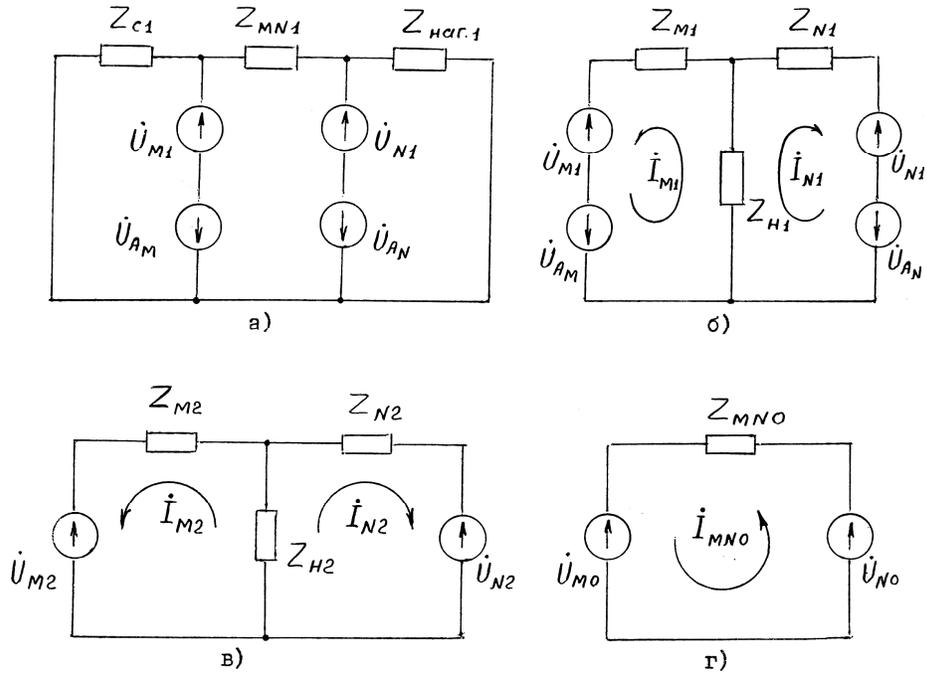


Рис. 2. Расчетные схемы замещения прямой (а,б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей к рис. 1

Согласно этим схемам, уравнения напряжений для контуров запишем в виде

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{A_M} &= \dot{U}_{M1} + (Z_{M1} + Z_{H1})\dot{I}_{M1} + Z_{H1}\dot{I}_{N1}; \\
 0 &= \dot{U}_{M2} + (Z_{M2} + Z_{H2})\dot{I}_{M2} + Z_{H2}\dot{I}_{N2}; \\
 0 &= \dot{U}_{M0} + Z_{MN0}\dot{I}_{M0} - \dot{U}_{N0}; \\
 \dot{U}_{A_N} &= \dot{U}_{N1} + (Z_{N1} + Z_{H1})\dot{I}_{N1} + Z_{H1}\dot{I}_{M1}; \\
 0 &= \dot{U}_{N2} + (Z_{N2} + Z_{H2})\dot{I}_{N2} + Z_{H2}\dot{I}_{M2}; \\
 0 &= \dot{U}_{N0} + Z_{MN0}\dot{I}_{N0} - \dot{U}_{M0}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Из (5) с учетом (3) и (4) получим

$$\dot{I}_{M1} = \frac{\dot{U}_{A_M} - \dot{U}_{A_N}}{Z_{M1} + Z_{N1} + Z_D}, \tag{6}$$

где $Z_D = Z_{M2} + Z_{N2} + Z_{MN0}$.

Из (3)-(5) определяем все симметричные составляющие токов и напряжений.

Составляющие токов аварийного режима на отдельных участках сети можно определить при помощи коэффициентов распределения [3], принимая в качестве заданных токи отдельных последовательностей в точках М и N. Эти коэффициенты могут быть определены при помощи матриц инцидентности и сопротивлений, составленных на основании топологии схем отдельных последовательностей [3]. При этом могут быть учтены и сопротивления нагрузки.

Фазные токи на участках сети определяются с учетом токов доаварийного режима.

Замыкание на землю фазы В в точке М и фазы С в точке N. На основании граничных условий получаем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{M2} &= a\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{M0} = a^2\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{BM1} = \dot{I}_{BM2} = \dot{I}_{M0}a^2\dot{I}_{M1}, \\ \dot{I}_{N2} &= a^2\dot{I}_{N1}; \dot{I}_{N0} = a^2\dot{I}_{N1}; \dot{I}_{CM1} = \dot{I}_{CM2} = \dot{I}_{N0} = a\dot{I}_{N1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из дополнительного граничного условия $\dot{I}_{BM} = -\dot{I}_{CN}$ получаем

$$\dot{I}_{N1} = -a\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N0} = -\dot{I}_{M0} = a^2\dot{I}_{M1}. \quad (8)$$

Заменив в исходной системе (5) все токи на \dot{I}_{M1} , получим решение

$$\begin{aligned} \dot{I}_{M1} &= \frac{\dot{U}_{AM} - a^2\dot{U}_{AN}}{Z_{M1} + Z_{N1} + 3Z_{H1} + Z'_D}, \\ \dot{I}_{N1} &= -a\dot{I}_{M1} = \frac{\dot{U}_{AN} - a\dot{U}_{AM}}{Z_{M1} + Z_{N1} + 3Z_{H1} + Z'_D}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $Z'_D = Z_D + 3Z_{H2}$.

Граничные условия и расчетные выражения для \dot{I}_{M1} при всех возможных комбинациях замыкания фаз на землю в точках М и N в сети с малым током замыкания на землю приведены в табл .1.

Замыкания на землю фазы А в точке М, фаз В и С в точке N. Исходная схема замещения отличается от схемы рис.1 тем, что в точке N продольная несимметрия выражена разрывом только фазы А. Граничные условия при этом будут

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AA'_M} &= 0; \dot{I}_{B_M} = 0; \dot{I}_{C_M} = 0; \\ \dot{U}_{BB'_N} &= 0; \dot{U}_{CC'_N} = 0; \dot{I}_{A_N} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

и дополнительное граничное условие:

$$\dot{I}_{A_M} + \dot{I}_{B_N} + \dot{I}_{C_N} = 0. \quad (11)$$

Таблица 1

Замкнутая фаза в точках		Дополнит. граничные условия	Соотношения между симметричными составляющими	Выражения для определения I_{M1}
M	N			
A	A	$\dot{I}_{A_M} = -\dot{I}_{A_N}$	$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{N0} = -\dot{I}_{M1}$	$\frac{\dot{U}_{A_M} - \dot{U}_{A_N}}{Z_{M1} + Z_{N1} + Z_D}$
B	B	$\dot{I}_{B_M} = -\dot{I}_{B_N}$	$\dot{I}_{N1} = -\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -a\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a^2\dot{I}_{M1}$	
C	C	$\dot{I}_{C_M} = -\dot{I}_{C_N}$	$\dot{I}_{N1} = -\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = a^2\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a\dot{I}_{M1}$	
A	B	$\dot{I}_{A_M} = -\dot{I}_{B_N}$	$\dot{I}_{N1} = -a\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a^2\dot{I}_{M1}$	$\frac{\dot{U}_{A_M} - a^2\dot{U}_{A_N}}{Z_{M1} + Z_{N1} + 3Z_{H1} + Z'_D}$
B	C	$\dot{I}_{B_M} = -\dot{I}_{C_N}$	$\dot{I}_{N1} = -a\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a^2\dot{I}_{M1}$	
C	A	$\dot{I}_{C_M} = -\dot{I}_{A_N}$	$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{N0} = -a\dot{I}_{M1}$	
A	C	$\dot{I}_{A_M} = -\dot{I}_{C_N}$	$\dot{I}_{N1} = -a^2\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -a\dot{I}_{M1}$ $\dot{I}_{N0} = -\dot{I}_{M1}$	$\frac{\dot{U}_{A_M} - a\dot{U}_{A_N}}{Z_{M1} + Z_{N1} + 3Z_{H1} + Z'_D}$
C	B	$\dot{I}_{C_M} = -\dot{I}_{B_N}$	$\dot{I}_{N1} = -a^2\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a\dot{I}_{M1}$	
B	A	$\dot{I}_{B_M} = -\dot{I}_{A_N}$	$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{N0} = -a^2\dot{I}_{M1}$	
C	B	$\dot{I}_{C_M} = -\dot{I}_{B_N}$	$\dot{I}_{N1} = -a^2\dot{I}_{M1}; \dot{I}_{N2} = -\dot{I}_{M1};$ $\dot{I}_{N0} = -a\dot{I}_{M1}$	
B	A	$\dot{I}_{B_M} = -\dot{I}_{A_N}$	$\dot{I}_{N1} = \dot{I}_{N2} = \dot{I}_{N0} = -a^2\dot{I}_{M1}$	

Из (10) и (11) получаем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{M1} = \dot{I}_{M2} = \dot{I}_{M0} &= \frac{1}{3}\dot{I}_{A_M}; \\ \dot{I}_{N0} &= -\frac{1}{3}\dot{I}_{A_M} = -\dot{I}_{M1}; \quad \dot{I}_{N2} = -(\dot{I}_{N1} + \dot{I}_{N0}); \\ \dot{U}_{M1} &= -(\dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0}); \quad \dot{U}_{N1} = \dot{U}_{N2} = \dot{U}_{N0}. \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом соотношений (12) решение уравнений (5) дает

$$\begin{aligned} \dot{i}_{N0} &= \frac{(D+B)\dot{U}_{A_M} + (aB - a^2D)\dot{U}_{A_N}}{AD - BC}; \\ \dot{i}_{N1} &= \frac{(A-C)\dot{U}_{A_M} + (a^2C - aA)\dot{U}_{A_N}}{AD - BC}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} A &= (a^2 - 1)Z_{H1} + 2(a - 1)Z_{H2} + aZ_{N2} - (Z_{M1} + Z_{M2}) - Z_{MN0}; \\ B &= (1 - a^2)Z_{H1} + (a - 1)Z_{H2} + aZ_{N2} - a^2Z_{N1}; \\ C &= (a - 1)Z_{H1} + 2(a^2 - 1)Z_{H2} + a^2Z_{N2} - (Z_{M1} + Z_{M2}) - Z_{MN0}; \\ D &= (1 - a)Z_{H1} + (a^2 - 1)Z_{H2} + a^2Z_{N2} - aZ_{N1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Затем определяются $\dot{i}_{N2} = -(\dot{i}_{N1} + \dot{i}_{N0})$ и $\dot{i}_{M1} = \dot{i}_{M2} = \dot{i}_{M0} = -\dot{i}_{N0}$.

ДВОЙНЫЕ К.З. В СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Замыкание на землю фазы А в точках М и N. Условия (1) и соотношения (3) сохраняются. Если сеть представить по рис 1, но с заземленными нейтралью со стороны Z_c и $Z_{наг}$, то в системе (5) для рассматриваемого случая, согласно схеме замещения рис.3, третье и шестое уравнения принимают вид

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{U}_{M0} + (Z_{M0} + Z_{H0})\dot{i}_{M0} + Z_{H0}\dot{i}_{N0}; \\ 0 &= \dot{U}_{N0} + (Z_{N0} + Z_{H0})\dot{i}_{N0} + Z_{H0}\dot{i}_{M0}. \end{aligned} \quad (15)$$

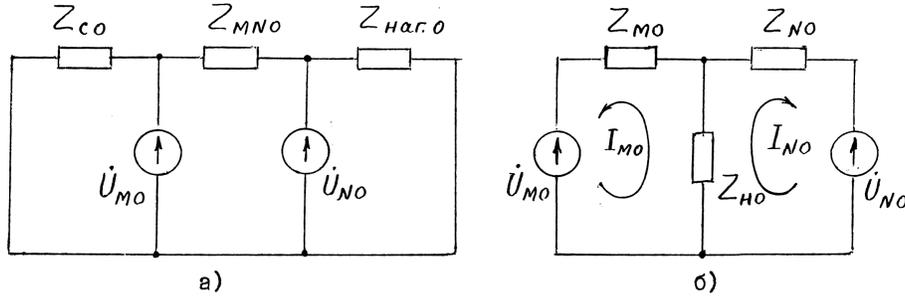


Рис. 3. Схема замещения нулевой последовательности собственно аварийного режима для сети с большим током замыкания на землю

С учетом (4) и (15) из системы (5) получаем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{M1} &= \frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - \dot{U}_{A_N}Z_{H_A}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_A}^2}; \\ \dot{I}_{N1} &= \frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{M_A} + Z_{H_A}) - \dot{U}_{A_M}Z_{H_A}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_A}^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $Z_{M_A} = Z_{M1} + Z_{M2} + Z_{M0}$; $Z_{N_A} = Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N0}$; $Z_{H_A} = Z_{H1} + Z_{H2} + Z_{H0}$.

Замыкание на землю фазы В в точке М и фазы С в точке N. Граничные условия соответствуют (7). Решение (5) с учетом (15) дает

$$\begin{aligned} \dot{I}_{M1} &= \frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - a^2\dot{U}_{A_N}Z_{H_C}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}; \\ \dot{I}_{N1} &= \frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{M_A} + Z_{H_A}) - a\dot{U}_{A_M}Z_{H_B}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $Z_{H_B} = a^2Z_{H1} + aZ_{H2} + Z_{H0}$; $Z_{H_C} = aZ_{H1} + a^2Z_{H2} + Z_{H0}$.

Выражения \dot{I}_{M1} и \dot{I}_{N1} для всех возможных сочетаний замыкания фаз на землю в точках М и N в сети с большим током замыкания на землю приведены в табл. 2.

Замыкания на землю фазы А в точке М, фаз В и С в точке N. Путем аналогичного подхода получаем систему уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A_M} &= A\dot{I}_{N1} + B\dot{I}_{N0} + C\dot{I}_{M0}; \\ a^2\dot{U}_{A_N} &= D\dot{I}_{N1} + E\dot{I}_{N0} + F\dot{I}_{M0}; \\ a\dot{U}_{A_N} &= G\dot{I}_{N1} + H\dot{I}_{N0} + K\dot{I}_{M0}, \end{aligned} \quad (18)$$

решение которой дает значение токов $\dot{I}_{M0} = \dot{I}_{M1} = \dot{I}_{M2}$, \dot{I}_{N1} и \dot{I}_{N0} , а следовательно, и $\dot{I}_{N2} = -(\dot{I}_{N1} + \dot{I}_{N0})$.

Анализ полученных результатов показывает, что описанный способ достаточно прост и нагляден, особенно в случаях расчета сложных видов к.з. – одновременных несимметричных к.з. в двух различных точках системы. Для последних в [4] исследованы две формы расчета, основанные на применении метода наложения:

- наложение на режим к.з. в одной точке последующего дополнительного режима, обусловленного к.з. во второй точке системы;
- наложение на предшествующий нагрузочный (доаварийный) режим дополнительного собственно аварийного режима с одновременным к.з. в двух различных точках.

Таблица 2

Замкнутая фаза в точках		Выражения токов прямой последовательности	
M	N	\dot{I}_{M1}	\dot{I}_{N1}
A	A	$\frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - \dot{U}_{A_N}Z_{H_A}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_A}^2}$	$\frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{M_A} + Z_{H_A}) - \dot{U}_{A_M}Z_{H_A}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_A}^2}$
B	B		
C	C		
A	B	$\frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - a^2\dot{U}_{A_N}Z_{H_C}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}$	$\frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{M_A} + Z_{H_A}) - a\dot{U}_{A_M}Z_{H_B}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}$
B	C		
C	A		
A	C	$\frac{\dot{U}_{A_M}(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - a\dot{U}_{A_N}Z_{H_B}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}$	$\frac{\dot{U}_{A_N}(Z_{M_A} + Z_{H_A}) - a^2\dot{U}_{A_M}Z_{H_C}}{(Z_{M_A} + Z_{H_A})(Z_{N_A} + Z_{H_A}) - Z_{H_B}Z_{H_C}}$
C	B		
B	A		

Предложенный способ основан на второй форме принципа наложения и использует схемы замещения формы Z.

Одним из преимуществ рассмотренного способа является возможность его применения как в расчетах режимов к.з. электроэнергетических систем и электрических сетей, так и в инженерных расчетах внутренних к.з. электрических машин и трансформаторов. Последнее имеет большое практическое значение, так как существующие методы расчета витковых к.з. довольно сложны и громоздки, а для некоторых сложных видов к.з. они вообще отсутствуют [5].

Предлагаемый способ расчета, наряду с преимуществами, обусловленными методом наложения, обеспечивает наглядность и простоту решения задачи, возможность представления выражений симметричных составляющих токов в табличной форме и расширяет область применения метода наложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах / ГЭИ. - 1963. - 416 с.
2. **Сааков В. И. Шахбазян С.А.** К применению метода наложения в расчетах несимметричных коротких замыканий // Межвуз сб. науч. тр. Энергетика. Вып. 3 / ЕрПИ. - Ереван, 1979. - С. 34-40.
3. **Мельников Н.А.** Электрические сети и системы. - М.: Энергия, 1975. - 311 с.
4. **Чернин А. Б., Лосев С. Б.** Вычисление электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 526 с.
5. **Ипатов П.М., Добровский В.В., Цирлин Ю.Л.** Витковые замыкания в петлевых обмотках асинхронных машин // Вестник электропромышленности. - 1962. - N 7. - С. 36-43.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.04.2005.

Ս.Ա. ՇԱԿԲԱԶՅԱՆ

ՈՉ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ԿԱՐՃ ՄԻԱՅՈՒՄՆԵՐԻ ԲԱՐՂ ՏԵՍԱԿՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄԵԹՈՂԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ԿԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Առաջարկվում է ոչ սիմետրիկ կարճ միացումների հաշվարկի մեթոդ, որը հիմնված է վերադրման սկզբունքի կիրառման վրա, ներկայացվում է սեփական վթարային սխեման ոչ սիմետրիկ ձևով՝ մեկ կամ երկու ֆազերի խզումով: Բերվում են հոսանքի և լարման արտահայտությունները ցանցի տարբեր կետերում բազմակի ոչ սիմետրիկ կարճ միացումների համար:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաշարժիչ ուժ (ԷՇՈՒ), կարճ միացում (կ.մ), վերադրման մեթոդ, ուղու հաշորդականություն:

S.A. SHAGHBAZIAN

APPLICATION OF SUPERPOSITION METHOD FOR CALCULATING COMPLETE TYPES OF ASYMMETRICAL SHORT CIRCUITS

A method for calculating asymmetrical short circuits based on using the principle of superposition presenting eigenvalue emergency scheme as one or two phases is proposed. Calculation expressions for defining currents and voltages for multiple asymmetrical short circuits in different currents in the network are given.

Keywords: emf, short circuit, superposition method, straight sequence.