

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЗАЩИТАХ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–10 кВ

В.А. ШУИН, д-р техн. наук, Д.И. ГАНДЖАЕВ, инж., О.А. САРБЕЕВА, Е.С. ШАГУРИНА, аспиранты

Приведены результаты анализа и оценки информационных параметров электрических величин переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях напряжением 6–10 кВ, влияющих на принципы выполнения и динамическую устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений. Исследования выполнены на основе приближенного аналитического решения уравнений переходного процесса при замыканиях на землю и математического моделирования на ЭВМ с применением системы Matlab.

Ключевые слова: электрические сети среднего напряжения 6–10 кВ, замыкания на землю, электромагнитные переходные процессы, информационные параметры электрических величин переходных процессов, защиты от замыканий на землю.

APPLICATION FEATURES OF TRANSITION ELECTRICAL VALUES IN EARTH-FAULT PROTECTION OF 6–10 KW ELECTRICAL NETWORKS

V.A. SHUIN, Doctor of Engineering, D.I. GANDZHAEV, Engineer,
O.A. SARBEEVA, E.S. SHAGURINA, Post Graduate Students

This article suggests the analysis and evaluation results of information parameters of transition electrical values at single-phase short circuit at 6–10 kW electrical networks. These results influence the implementation principles and dynamical stability of functioning earth-fault protection. The investigations are executed on the base of the analytic solution to single-phase earth fault transient equations and mathematical computer simulation with using MATLAB software.

Keywords: medium-voltage electrical networks, earth faults, electromagnetic transient, information parameters of transient electrical values, earth-fault protection.

Введение. Большая часть электрической энергии распределяется потребителям через сети среднего напряжения 6–10 кВ, протяженность которых в России составляет около 1 млн км. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР) или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, являются наиболее вероятным видом повреждений (70–90 % от общего числа электрических повреждений) и часто являются причиной опасных кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) или аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере зависит от технического совершенства (селективности и устойчивости функционирования) устройств защиты от ОЗЗ.

В рассматриваемых сетях в качестве защиты от ОЗЗ, действующей на сигнал или на отключение, применяются два основных типа устройств, соответственно основанных:

- на контроле значений и соотношений различных составляющих установившегося тока и напряжения нулевой последовательности (промышленной частоты, высших гармоник, «наложенных» токов – искусственно создаваемых при ОЗЗ составляющих непромышленной частоты);

- контроле значений и соотношений электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя (первого и последующих) изоляции фазы сети на землю.

Для устройств защиты первого типа токи и напряжения электромагнитного переходного процесса при ОЗЗ являются помехами, искажающими значения и соотношения контролируемых величин установившегося режима ОЗЗ и оказывающими значительное влияние на динамическую устойчи-

вость их функционирования. Для устройств второй группы электрические величины переходного процесса являются информационными сигналами.

К основным параметрам электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ, влияющим на функционирование устройств защиты обеих указанных групп, относятся:

- значения токов и напряжений переходного процесса (амплитуды и интегральные значения) и их соотношения;

- частотные характеристики переходных токов и напряжений (спектр частот, амплитудно-частотные характеристики, энергетические характеристики);

- фазовые соотношения электрических величин переходного процесса.

Основными факторами, влияющими на значения и частоты переходных токов при ОЗЗ, являются: суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, индуктивность источника питания L_{Σ} , удаленность l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, режим заземления нейтрали сети [1, 2].

Исследование и оценка параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения представляют важную задачу, решение которой необходимо для повышения технического совершенства защит от данного вида повреждений, прежде всего устойчивости функционирования при наиболее опасных дуговых прерывистых (перемежающихся) замыканиях на землю.

Методика исследования и оценки информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ. Для определения значений и оценки диапазонов возможного изменения информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ и исследо-

вания влияния на них указанных выше факторов могут быть использованы:

- аналитическое решение для уравнений переходного процесса при ОЗЗ;
- математическое моделирование переходных процессов при ОЗЗ на ЭВМ.

Имитационное моделирование на ЭВМ является наиболее мощным средством количественного анализа переходных процессов при ОЗЗ. Однако большое число факторов, влияющих на форму и значения переходных токов, и широкий диапазон изменения многих из них приводят к тому, что с применением метода имитационного моделирования можно проанализировать лишь ограниченную часть из практически бесконечного числа расчетных вариантов, соответствующих конкретным сочетаниям влияющих факторов. Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому наилучшим способом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенной модели электрической сети среднего напряжения и метода имитационного моделирования на ЭВМ, обеспечивающего возможности усложнения и повышения точности модели.

Аналитическое определение значений информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в сетях напряжением 6–10 кВ. Практически все известные способы выполнения и исполнения устройств защиты от ОЗЗ основаны на использовании тока i_0 и напряжения u_0 нулевой последовательности. Аналитические решения для тока i_0 и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ можно получить только для упрощенной модели (схемы замещения) электрической сети. В то же время модель сети должна по возможности учитывать все основные факторы, влияющие на форму и амплитуду свободных составляющих i_0 и u_0 . В [1, 2] показано, что этому требованию в достаточной степени удовлетворяет схема замещения электрической сети среднего напряжения, учитывающая наличие в электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ двух основных частотных составляющих – разрядной (связанной с разрядом емкостей поврежденной фазы) и зарядной (связанной с подзарядом емкостей неповрежденных фаз) (рис. 1).

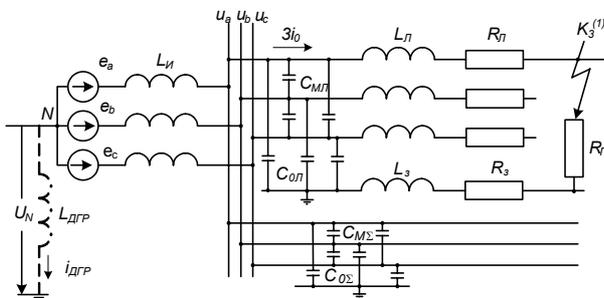


Рис. 1. Двухчастотная схема замещения радиальной сети 6–10 кВ для анализа переходных процессов при ОЗЗ

Для схемы замещения сети (рис. 1), работающей с изолированной нейтралью, для напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$ можно получить следующие уравнения [1, 2]:

$$u_0(t) = u_{np} + u_p + u_3 \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 e^{-\delta_p t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \sin(\omega_p t + \varphi_p) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_p t \right] - U_m a_2 e^{-\delta_3 t} \left[\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) - \frac{u_N(0)}{U_m} \cos \omega_3 t \right]; \quad (1)$$

$$U_{mp} = U_m a_1 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p}; \quad (2)$$

$$U_{m3} = U_m a_2 \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3}, \quad (3)$$

где u_{np} – принужденная составляющая переходного напряжения $u_0(t)$; u_p – разрядная составляющая напряжения $u_0(t)$; u_3 – зарядная составляющая напряжения $u_0(t)$; U_m – амплитуда составляющей напряжения промышленной частоты на поврежденной фазе; $u_N(0)$ – напряжение смещения нейтрали сети

в момент пробоя изоляции; ω_p – частота разрядных колебаний; ω_3 – частота зарядных колебаний; δ_p – постоянная затухания разрядных колебаний; δ_3 – постоянная затухания зарядных колебаний;

$$tg \varphi_p = \frac{\omega_p \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_p \sin \varphi}; \quad tg \varphi_3 = \frac{\omega_3 \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_3 \sin \varphi};$$

$$a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; \quad a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2}.$$

Частоты ω_p , ω_3 и постоянные затухания δ_p , δ_3 разрядных и зарядных колебаний определяются из следующих уравнений [1, 2]:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (4)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (5)$$

$$\delta_p = \alpha \frac{\omega_p^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_p^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (6)$$

$$\delta_3 = \alpha \frac{\omega_3^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_3^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}, \quad (7)$$

где $\alpha_1 = R_1/L_1$; $\omega_1^2 = 1/L_1 C_1$; $\omega_2^2 = 1/L_2 C_2$; $k_c = 1 + C_1/C_2$; $L_1 = 3L_\Gamma + L_3$; $C_1 = C_{0\Sigma} + C_{0Л}$; $C_2 = 0,5[C_{0\Sigma} + C_{0Л} + 3(C_{М\Sigma} + C_{МЛ})]$.

Переходный ток ОЗЗ в месте повреждения для сети с изолированной нейтралью пропорционален производной напряжения $u_0(t)$:

$$3i_0 = -3C_1 du_0/dt = i_{np} + i_3 + i_p =$$

$$= 3C_{0\Sigma} U_m \cos(\omega t + \varphi) + I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) +$$

$$+ I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3); \quad (8)$$

$$I_{mp} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_p a_1 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}{\omega_p^2 + \delta_p^2}}; \quad (9)$$

$$I_{m3} = -3C_{0\Sigma} U_m \omega_3 a_2 \sqrt{\frac{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}{\omega_3^2 + \delta_3^2}}; \quad (10)$$

где $\theta_{p,3} = \varphi_{p,3} + \arctg \frac{\delta_{p,3}}{\omega_{p,3}}$.

В компенсированных сетях ДГР, в силу своей инерционности, практически не влияет на амплитуду и частоту разрядной и зарядной составляющих переходного тока, поэтому параметры свободных составляющих тока и напряжения приближенно могут быть определены по (1)–(10).

При дуговых прерывистых ОЗЗ пробой изоляции при повторных пробоях возникает при больших, чем амплитуда U_m , значениях напряжения, что приводит к пропорциональному увеличению амплитуд разрядной и зарядной составляющих. Зная предельные значения напряжения на поврежденной фазе при повторных пробоях изоляции (например, [3]), по выражениям (8)–(10) можно определить составляющие переходного тока и при дуговых прерывистых ОЗЗ.

Амплитуды переходных токов при ОЗЗ. Амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного тока нулевой последовательности определялись по уравнениям (9), (10). На рис. 2 приведены полученные по указанным уравнениям ток переходного процесса при ОЗЗ и его составляющие.

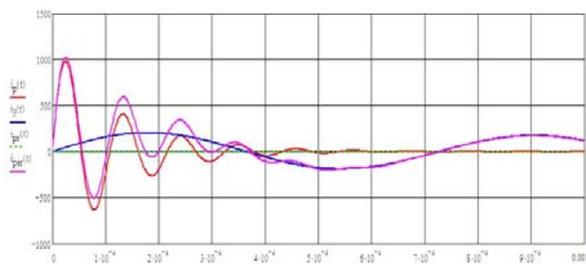


Рис. 2. Токи переходного процесса при ОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 30$ А при удаленности места ОЗЗ от шин $l_3 = 1$ км и $\varphi = 90^\circ$: $i_p(t)$ – разрядная составляющая; $i_3(t)$ – зарядная составляющая; $i_{np}(t)$ – принужденная составляющая; $i(t)$ – полный ток переходного процесса

Анализ полученных токов и составляющих (рис. 2) показывает, что при малых потерях в контуре нулевой последовательности сети 6–10 кВ, когда разрядная составляющая переходного тока $i_p(t)$ при ОЗЗ сохраняет колебательный характер, $I_{mp} \gg I_{m3}$ и амплитуда полного переходного тока $I_{m\text{пер}}$ определяется в основном значением I_{mp} и может быть определена как значение тока $3i_0$ при $t = t_m \approx 1/4f_p$ по выражению (8).

Наиболее существенное влияние на амплитуду I_{m3} зарядной составляющей тока переходного процесса оказывает величина суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и индуктивности источника питания L_U (определяемой по значению тока трехфазного КЗ на шинах), на амплитуду разрядной составляющей I_{mp} – величина $I_{C\Sigma}$ и индуктивность повреж-

денной линии от шин до места пробоя, т.е. удаленность l_3 точки ОЗЗ от шин (рис. 3, 4).

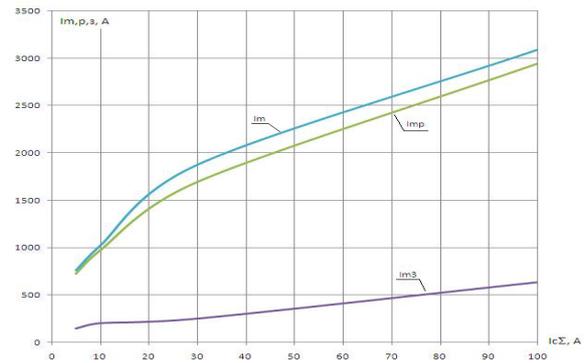


Рис. 3. Зависимости амплитуд зарядной и разрядной составляющих и амплитуды полного тока от суммарного емкостного тока $I_{C\Sigma}$ кабельной сети напряжением 6 кВ при $l_3 = 1$ км и $\varphi = 90^\circ$: I_{mp} – амплитуда разрядной составляющей переходного тока; I_{m3} – амплитуда зарядной составляющей переходного тока; I_m – амплитуда полного тока переходного процесса

Расчеты показали, что при изменении суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ от 5 до 100 А, тока трехфазного КЗ на шинах источника питания от 5 до 20 кА и удаленности места ОЗЗ от шин от 0,1 до 10 км амплитуда разрядного тока I_{mp} и полного тока переходного процесса I_m может изменяться в пределах от сотен ампер до ~3 кА, амплитуда зарядного тока I_{m3} – до ~1 кА.

Результаты, полученные аналитическим путем по уравнениям (1)–(10), были проверены моделированием на ЭВМ с учетом распределенного характера параметров поврежденной линии для идентичных расчетных условий (параметры сети и поврежденной линии): расхождение результатов аналитического расчета и моделирования на ЭВМ не превысило ~5 %.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показал, что при больших удаленностях l_3 места ОЗЗ от шин амплитуды разрядной и зарядной составляющих переходного тока становятся соизмеримыми.

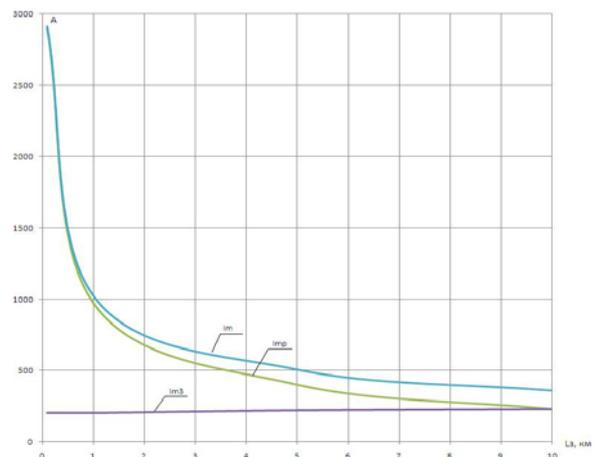


Рис. 4. Зависимости амплитуд зарядной, разрядной составляющих и амплитуды полного тока от расстояния l_3 до места повреждения в кабельной сети 6 кВ при $I_{C\Sigma} = 30$ А и $\varphi = 90^\circ$: I_{mp} , I_{m3} , I_m – то же, что и на рис. 3

Интегральные значения токов переходного процесса. Наиболее широкое применение в

электрических сетях 6–10 кВ получили токовые защиты (ТЗНП) и токовые направленные (ТНЗНП) защиты нулевой последовательности, реагирующие на интегральные (как, правило, среднеквадратичные) значения тока и напряжения нулевой последовательности в защищаемом присоединении. ТЗНП с измерительными органами на электромеханической базе и большинство исполнений микропроцессорных ТЗНП и ТНЗНП реагируют на среднеквадратичное значение контролируемого тока. В микроэлектронных и микропроцессорных исполнениях для действия ТЗНП и ТНЗНП могут быть использованы также средневыврявленные значения контролируемых тока и напряжения нулевой последовательности.

Для исследования динамической устойчивости функционирования различных исполнений ТЗНП, а также некоторых исполнений токовых направленных защит от ОЗЗ (ТНЗНП) представляют интерес интегральные значения переходных токов при однократном пробое изоляции (рис. 5) и дуговым перемежающемся ОЗЗ (рис. 6).

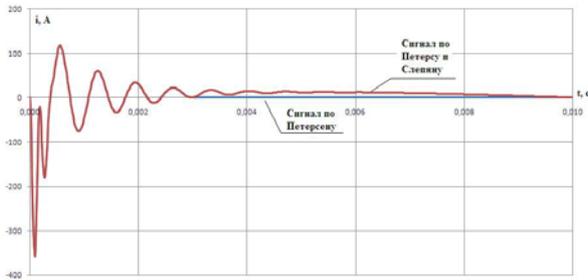


Рис. 5. Однократные пробое изоляции с гашениями заземляющей дуги при переходе через нуль тока свободных колебаний (теория Петерсена) и при переходе через нуль тока промышленной частоты (теория Петерса и Слепяна)

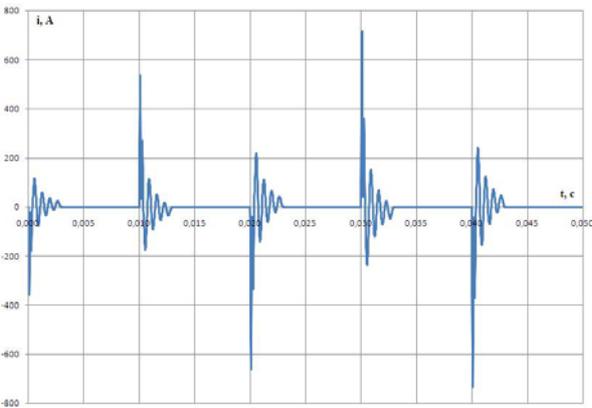


Рис. 6. Перемежающееся дуговое ОЗЗ с гашениями заземляющей дуги при переходе через нуль тока свободных колебаний и повторными пробоями изоляции каждый полупериод промышленной частоты

Для однократного пробоя изоляции с гашением дуги при последнем переходе через нуль тока свободных колебаний (худший случай по условиям отстройки ТЗНП от внешних ОЗЗ) из уравнений (9), (10) получим:

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} (i_p + i_3)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right)^2 dt}; \quad (11)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_3 + i_p| dt = \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} \left| I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right| dt; \quad (12)$$

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} (i_p + i_3)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right)^2 dt}; \quad (13)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_3 + i_p| dt = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left| I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right| dt, \quad (14)$$

где $T_{зам}$ – время полного затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ (может быть принято равным ~3–5 мс [3]).

Для случая гашения заземляющей дуги в момент перехода через нуль тока промышленной частоты (теория Петерса и Слепяна) получим:

$$I_{эфф.одн} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} i_{неп}^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} (i_p + i_3)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left(I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right)^2 dt}; \quad (15)$$

$$I_{ср.одн} = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |i_{неп}| dt \approx \frac{1}{T_{зам}} \int_0^{T_{зам}} |i_3 + i_p| dt = \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} \left| I_{mp} e^{-\delta_p t} \cos(\omega_p t + \theta_p) + I_{m3} e^{-\delta_3 t} \cos(\omega_3 t + \theta_3) \right| dt, \quad (16)$$

где $T_{50} = 20$ мс – период тока промышленной частоты.

Расчеты по выражениям (11) и (12) показывают, что фактором, оказывающим наибольшее влияние на интегральные значения переходного тока при однократном пробое, является суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$ (рис. 7).

Анализ полученных зависимостей (рис. 7) показывает, что интегральные значения переходного

тока в месте ОЗЗ на интервале времени наблюдения, равном времени затухания свободных составляющих $T_{зам}$, могут в несколько раз превышать среднеквадратичное ($I_{CΣ}$) и средневыпрямленное ($I_{CΣ} / 1,11$) значения установившегося тока повреждения.

Следует отметить, что средневыпрямленное значение переходного тока возрастает в значительно меньшей степени, чем среднеквадратичное значение. Это означает, что защиты от ОЗЗ (например, ТЗНП), реагирующие на средневыпрямленное значение тока, лучше отстроены от влияния электромагнитных переходных процессов, чем защиты, реагирующие на среднеквадратичное значение контролируемого тока.

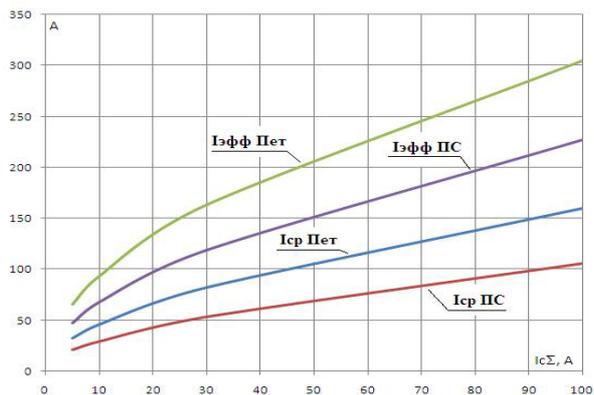


Рис. 7. Зависимости среднеквадратичных (эффективных) и средневыпрямленных значений переходных токов от суммарного емкостного тока кабельной сети 6 кВ при однократном пробое изоляции ($l_3 = 1$ км, $\varphi = 90^0$): $I_{эфф.Пет}$, $I_{ср.Пет}$ – эффективное и средневыпрямленное значения при гашении заземляющей дуги в момент перехода через ноль свободной составляющей тока переходного процесса (теория Петерсена); $I_{эфф.ПС}$, $I_{ср.ПС}$ – то же самое при гашении заземляющей дуги в момент перехода через ноль принужденной составляющей (теория Петерса и Слепяна)

При перемежающемся дуговым ОЗЗ по теории Петерсена (рис. 7) амплитуда переходного тока при повторных пробоях изоляции в пределе может увеличиваться в 2,0–2,5 раза, по сравнению с амплитудой переходного тока при первом пробое, при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерса и Слепяна – примерно в 2 раза. С учетом этого для дугового перемежающегося ОЗЗ по теории Петерсена при повторных пробоях каждый полупериод промышленной частоты максимальные значения эффективного и средневыпрямленного тока могут быть определены с учетом уравнений (9), (10) по следующим выражениям:

$$I_{эфф} \approx \sqrt{\frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} [(2 \div 2,5) i_{пер}]^2 dt}; \quad (17)$$

$$I_{ср} \approx \frac{2}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |(2 \div 2,5) i_{пер}| dt. \quad (18)$$

Для дугового перемежающегося ОЗЗ по теории Петерса и Слепяна при повторных пробоях изоляции каждый период промышленной частоты:

$$I_{эфф} \approx \sqrt{\frac{1}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} [2i_{пер}]^2 dt}; \quad (19)$$

$$I_{ср} \approx \frac{1}{T_{50}} \int_0^{T_{50}/2} |2i_{пер}| dt. \quad (20)$$

Сравнение уравнений (17), (18) и (19), (20) показывает, что при дуговых прерывистых ОЗЗ, развивающихся в соответствии с теорией Петерсена, среднеквадратичное значение переходного тока будут больше, чем при дуговом прерывистом ОЗЗ, развивающемся по теории Петерса и Слепяна (рис. 8).

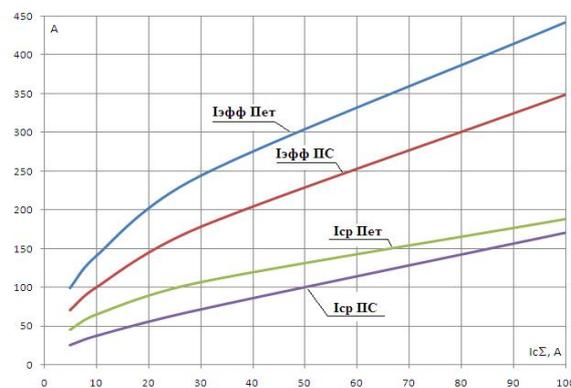


Рис. 8. Зависимости среднеквадратичных (эффективных) и средневыпрямленных значений переходного тока от суммарного емкостного тока кабельной сети 6 кВ при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена и Петерса и Слепяна ($l_3 = 1$ км, $\varphi = 90^0$): $I_{эфф.Пет}$, $I_{ср.Пет}$, $I_{эфф.ПС}$, $I_{ср.ПС}$ – то же самое, что и на рис. 7

Анализ зависимостей (рис. 8) показывает, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ среднеквадратичное (эффективное) и средневыпрямленное значения контролируемого защитой тока может увеличиваться в 5–15 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что приводит к необходимости значительного заглубления ряда исполнений ТЗНП и ограничению их чувствительности и области возможного применения [4].

Результаты, полученные с использованием аналитического метода, были проверены на более точной математической модели в системе MATLAB, учитывающей, в частности, распределенный характер параметров линий. Сравнение результатов, полученных аналитическим методом, с результатами моделирования на ЭВМ показало их хорошее совпадение.

Частоты токов переходного процесса.

Частоты разрядной $i_{ор}$ и зарядной $i_{оз}$ составляющих тока переходного процесса могут быть определены по (4) и (5). На рис. 9 приведены зависимости частот разрядной и зарядной составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ от основных влияющих факторов: суммарного емкостного тока сети и расстояния до места ОЗЗ.

Анализ результатов расчета показал, что частоты указанных составляющих f_3 и f_p в зависимости от параметров электрической сети и положения места ОЗЗ приблизительно изменяются в пределах: $f_p = 3000–30000$ Гц и $f_3 = 300–2000$ Гц.

Влияние частотной фильтрации на интегральные значения переходных токов ОЗЗ. Ограничить влияние токов переходного процесса на устойчивость функционирования ТЗНП при внешних дуговых прерывистых ОЗЗ можно с помощью входных фильтров низших частот (ФНЧ).

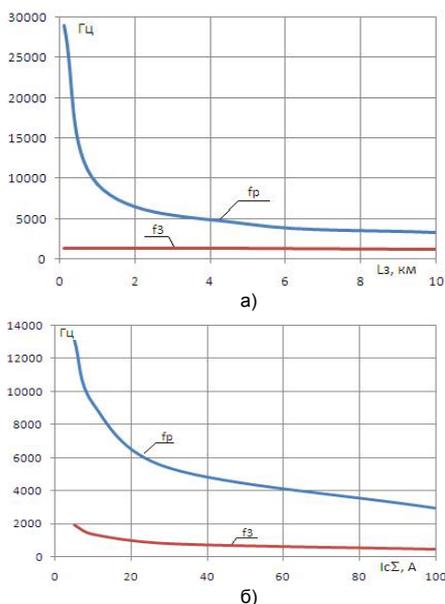


Рис. 9. Зависимости частот зарядной и разрядной составляющих переходного тока ОЗЗ: а – от расстояния до места замыкания l_3 ; б – от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$

Представляет интерес влияние частоты среза ФНЧ на эффективность отстройки от влияния переходных токов. При анализе применялся фильтр Чебышева 2-го порядка.

На рис. 10, 11 приведены зависимости среднеквадратичного и средневыпрямленного значений переходных токов при дуговых перемежающихся ОЗЗ при применении в цепях тока защиты входных ФНЧ с различными значениями частоты среза (от 300 до 3000 Гц). Применение ФНЧ с частотой среза около 500 Гц позволяет ограничить средневыпрямленное значение переходного тока при дуговом перемежающемся ОЗЗ до значений, не превышающих средневыпрямленное значение установившегося тока замыкания на землю, т.е. обеспечивает эффективную отстройку от влияния токов переходного процесса.

Для получения аналогичного эффекта для ТЗНП, основанной на использовании среднеквадратичных (эффективных) значений контролируемого тока, необходимо применение ФНЧ с частотой среза около 300 Гц (рис. 12).

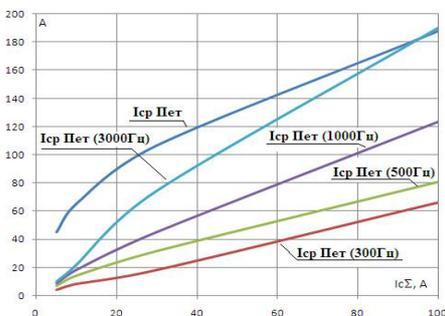


Рис. 10. Зависимости средневыпрямленных значений токов при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена с учетом фильтрации

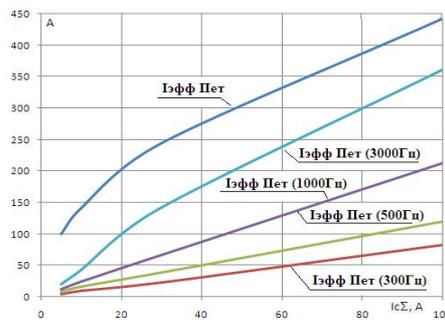


Рис. 11. Зависимости среднеквадратичных (эффективных) значений токов при дуговом перемежающемся ОЗЗ по теории Петерсена с учетом фильтрации

Напряжения переходного процесса при ОЗЗ. На рис. 12 приведены полученные по уравнениям (1)–(3) напряжения нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ и его составляющие.

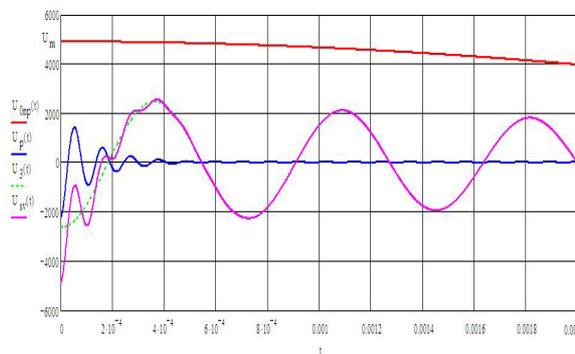


Рис. 12. Напряжения переходного процесса при ОЗЗ в сети 6 кВ с $I_{C\Sigma} = 30$ А, удаленности места ОЗЗ от шин $l_3 = 1$ км и $\varphi =$: $u_p(t)$ – разрядная составляющая; $u_{pp}(t)$ – зарядная составляющая; $u_{пр}(t)$ – принужденная составляющая; $u_{св}(t) = u_p(t) + u_s(t)$ – свободная составляющая напряжения переходного процесса

Согласно уравнениям (2), (3) и рис. 12, при малых потерях в контуре нулевой последовательности сети 6–10 кВ разрядная и зарядная составляющие переходного напряжения $u_0(t)$ при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ имеют близкие амплитуды $U_{mp} \approx U_{m3}$, в частности, при $\varphi = 90^\circ$ $U_{mp} \approx U_{m3} \approx -U_m/2$. Отношение амплитуды зарядной составляющей U_{m3} к амплитуде разрядной составляющей U_{mp} переходного напряжения практически не зависит от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ (рис. 13, а), но возрастает при увеличении удаленности l_3 места ОЗЗ от шин, т.е. при уменьшении частоты разрядной составляющей (рис. 13, б).

При указанных соотношениях между U_{m3} и U_{mp} неучет влияния разрядной составляющей на переходный процесс при ОЗЗ, применяемый в некоторых работах в целях упрощения математической модели сети (например, одночастотная схема замещения сети при ОЗЗ), может привести к значительным погрешностям в оценке значений не только разрядной, но и зарядной составляющей переходного тока.

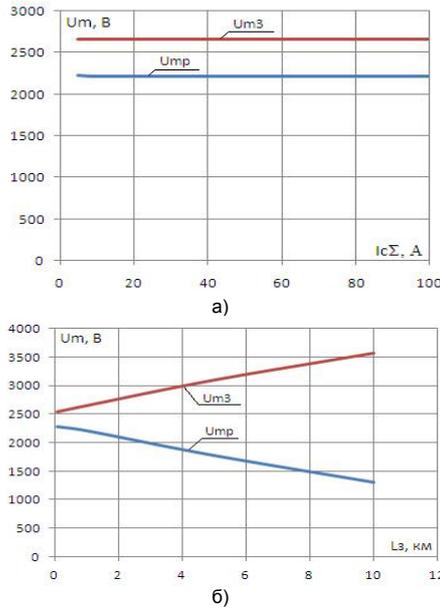


Рис. 13. Зависимости амплитуд зарядной U_{m3} и разрядной U_{mp} составляющих переходного напряжения от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ (а) и удаленности места ОЗЗ от шин I_3 (б) для кабельной сети 6 кВ

Спектральные характеристики переходных токов. Спектральная плотность $\tilde{S}(\omega)$, ее вещественная $A(\omega)$ и мнимая $B(\omega)$ части и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) непериодического сигнала $3i_0(t)$ определяются по выражениям [5]:

$$\tilde{S}(\omega) = \int_0^{t_H} 3i_0(t)e^{-j\omega t} dt = S(\omega)e^{-j\varphi(\omega)} = A(\omega) - jB(\omega); \quad (21)$$

$$A(\omega) = \int_0^{t_H} 3i_0(t)\cos \omega t dt; \quad (22)$$

$$B(\omega) = \int_0^{t_H} 3i_0(t)\sin \omega t dt; \quad (23)$$

$$S(\omega) = \sqrt{A(\omega)^2 + B(\omega)^2}, \quad (24)$$

где t_H – время наблюдения непериодического сигнала, принимаемое в данном случае равным времени затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ (~3–5 мс [3]).

Связь между энергией сигнала и его спектральной характеристикой устанавливается равенством Парсеваля:

$$E = \int_0^{t_H} [3i_0(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega)^2 d\omega, \quad (25)$$

где E – энергия, выделяемая током $i_3(t)$ на сопротивлении 1 Ом.

Основными факторами, влияющими на спектральные характеристики переходных токов при ОЗЗ, являются параметры C_1, C_2, L_1, L_2 . Емкостью фаз на землю C_1 определяется так называемый суммарный емкостный ток сети:

$$I_{C\Sigma} = 3C_1U_{\phi,НОМ} = 3C_1U_{НОМ} / \sqrt{3}. \quad (26)$$

Значение коэффициента k_c в (1) для сетей 6–10 кВ определяется в основном типом линий: ка-

бельные (КЛ) или воздушные (ВЛ) и для заданного типа линий изменяются в небольших пределах (например, для КЛ 6–10 кВ значение k_c , как правило, лежит в пределах 3,2–3,6). Поэтому можно считать, что значения C_1 и C_2 в первом приближении определяются величиной суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$. Индуктивность L_1 зависит в основном от удаленности точки ОЗЗ от шин источника питания I_3 (подстанции, электростанции), а L_2 определяется только индуктивностью источника питания. Последнюю удобно определять по току трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах $I_K^{(3)}$:

$$I_K^{(3)} \approx U_{\phi,НОМ} / \omega_0 L_u = U_{НОМ} / \sqrt{3}\omega_0 L_u. \quad (27)$$

По выражениям (22)–(25) с использованием выражений (1)–(10) были рассчитаны зависимости энергии тока переходного процесса при ОЗЗ E в диапазоне частот $f = 0$ –10000 Гц при варьировании суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ в пределах 5–100 А (рис. 14), удаленности места ОЗЗ от шин I_3 в пределах 0,1–10 км (рис. 15, 16) и величины тока трехфазного КЗ на шинах $I_K^{(3)}$ в пределах 5–20 кА (рис. 17, 18).

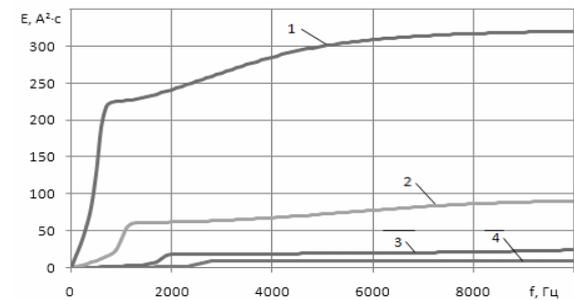


Рис. 14. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{НОМ} = 6$ кВ, $I_K^{(3)} = 10$ кА при $I_3 = 1$ км от частоты для различных значений суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$: 1 – $I_{C\Sigma} = 100$ А; 2 – $I_{C\Sigma} = 30$ А; 3 – $I_{C\Sigma} = 10$ А; 4 – $I_{C\Sigma} = 50$ А

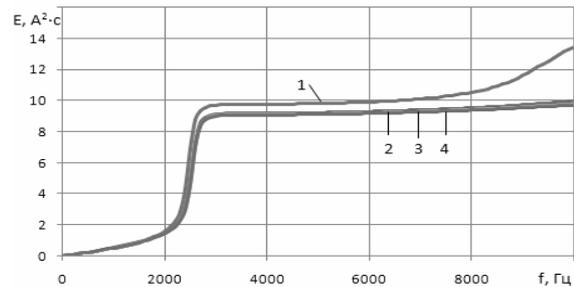


Рис. 15. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{НОМ} = 6$ кВ, $I_K^{(3)} = 10$ кА и $I_{C\Sigma} = 5$ А км от частоты при различных значениях удаленности места ОЗЗ от шин I_3 : 1 – $I_3 = 0,1$ км; 2 – $I_3 = 0,5$ км; 3 – $I_3 = 1$ км; 4 – $I_3 = 2$ км

Анализ приведенных зависимостей показывает, что основная часть энергии (более 90 %) свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ сосредоточена в спектральном диапазоне с верхней частотой $f = 3$ –4 кГц.

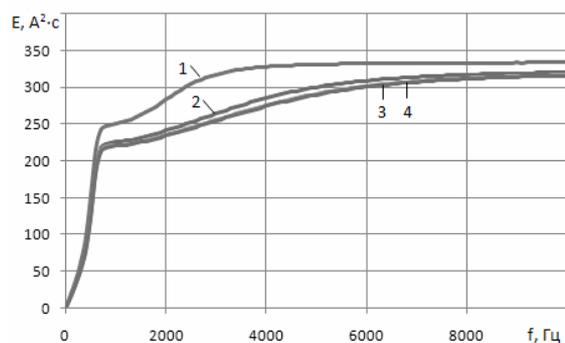


Рис. 16. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_K^{(3)} = 10$ кА и $I_{сз} = 100$ А км от частоты при различных значениях удаленности места ОЗЗ от шин l_s : 1 – $l_s = 0,1$ км; 2 – $l_s = 1$ км; 3 – $l_s = 5$ км; 4 – $l_s = 10$ км

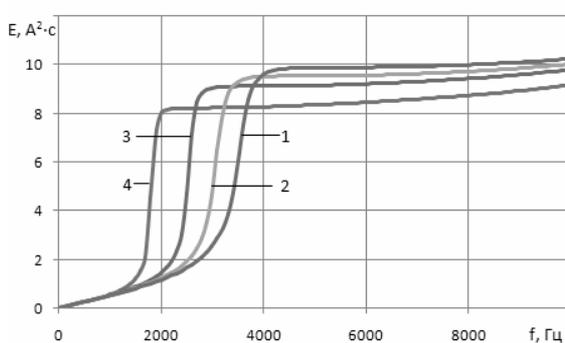


Рис. 17. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{сз} = 5$ А км при $l_s = 1$ км от частоты для различных значений тока трехфазного КЗ на шинах $I_K^{(3)}$: 1 – $I_K^{(3)} = 5$ кА; 2 – $I_K^{(3)} = 10$ кА; 3 – $I_K^{(3)} = 15$ кА; 4 – $I_K^{(3)} = 20$ кА

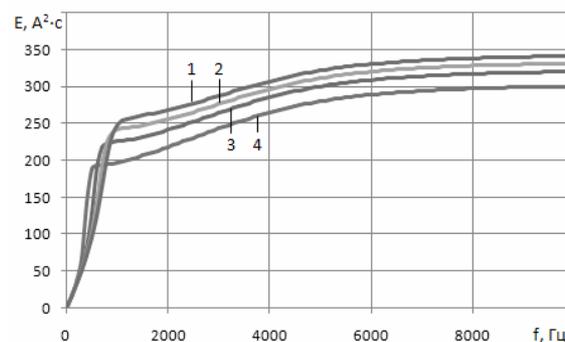


Рис. 18. Зависимость энергии свободных составляющих тока переходного процесса сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{сз} = 100$ А км при $l_s = 1$ км от частоты для различных значений тока трехфазного КЗ на шинах $I_K^{(3)}$: 1 – $I_K^{(3)} = 5$ кА; 2 – $I_K^{(3)} = 10$ кА; 3 – $I_K^{(3)} = 15$ кА; 4 – $I_K^{(3)} = 20$ кА

Наиболее существенное влияние на верхнюю частоту указанного диапазона оказывают суммарный емкостный ток сети и индуктивность источника питания (величина тока трехфазного КЗ на шинах источника). Полученные результаты показывают, что без ущерба для эффективности функционирования при внутренних повреждениях защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических вели-

чин переходного процесса, рабочий диапазон частот можно ограничить верхней частотой $f \leq 3-4$ кГц. Это позволяет существенно упростить требования к подобным защитам от ОЗЗ на микропроцессорной элементной базе.

Фазовые соотношения электрических величин переходного процесса используются в направленных импульсных защитах от ОЗЗ, контролирующих направление мгновенной мощности нулевой последовательности в момент пробоя изоляции. В [1, 2] показано, что в направленных защитах от ОЗЗ, основанных на использовании начальных фазовых соотношений электрических величин переходного процесса, в качестве поляризующей величины целесообразно использовать не напряжение $u_0(t)$, а производную du_0/dt , что обеспечивает не критичность устройства защиты к возможным за счет смещения нейтрали сети $u_N(0)$ искажениям начальных соотношений знаков между напряжением $u_0(t)$ и током $i_0(t)$.

Для определения направления (знака) мощности нулевой последовательности переходного процесса в импульсных устройствах защит от ОЗЗ используются два основных способа:

1) фиксация знака мгновенной мощности нулевой последовательности в момент пробоя изоляции фазы сети на землю по соотношению начальных знаков переходного тока $i_0(t)$ или суммы свободных составляющих $i_{0\text{св}}(t) = i_{0p}(t) + i_{0з}(t)$ и поляризующей величины: $u_0(t)$, du_0/dt или $du_{0\text{св}}/dt$ (практически в известных исполнениях импульсных направленных устройств защиты от ОЗЗ фиксация знаков сравниваемых величин происходит через 20 и более микросекунд после пробоя изоляции для отстройки от переходных процессов в трансформаторе напряжения, искажающих начальный знак переходного напряжения $u_0(t)$);

2) определение знака среднего значения мощности нулевой последовательности на всем интервале времени существования переходного тока $i_0(t)$.

Первый из указанных способов контроля направления мощности нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ используется в большинстве известных исполнений импульсных направленных устройств защиты от ОЗЗ: «Импульс», ИЗС-1, УЗС-01 и др. [6–8 и др.]. Недостатком способа является возможность искажения результатов мгновенной фиксации знака мощности и отказа функционирования устройства защиты за счет влияния импульсных помех во вторичных цепях тока и напряжения.

Второй способ, в принципе, обеспечивает более высокую устойчивость функционирования защиты в условиях влияния импульсных помех как при внутренних, так и при внешних ОЗЗ. Этот способ используется, в частности, в направленном устройстве сигнализации ОЗЗ типа «Спектр» [6]. Измерительный орган устройства «Спектр» в переходных режимах ОЗЗ реагирует на знак интегральной величины

$$J = \int_0^{t_{с.з}} \text{sign}(3i_0(t)) \cdot \text{sign}(d(3u_0(t))) / dt \quad (28)$$

в интервале времени срабатывания.

Из схемы замещения рис. 1 и уравнения (8) для переходного тока нулевой последовательности в неповрежденном и поврежденном присоединениях можно получить:

$$3i_{0\text{неп}} = 3C_{0\text{неп}} du_0 / dt; \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 3i_{0\text{ пов}} &= -\sum_k 3C_{0k\text{ неп}} du_0 / dt = \\
 &= -\sum_k 3(C_{0\Sigma} - C_{0\text{ пов}}) du_0 / dt,
 \end{aligned}
 \quad (30)$$

где $C_{0\text{ неп}}$ и $C_{0\text{ пов}}$ – емкость фазы на землю неповрежденной k -го и поврежденной присоединения соответственно; $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы сети на землю.

Согласно (8), (29) и (30), значение интегральной величины J в (28) для поврежденного присоединения всегда отрицательно, а для всех неповрежденных присоединений положительно. При наличии временных сдвигов между сравниваемыми величинами $3i_0$ и du_0 / dt , обусловленных угловыми погрешностями ТТНП, ТН и элементами схемы формирования сравниваемых величин, уравнение (28) фактически реализует способ сравнения времени совпадения с временем несовпадения.

В [9] предложено в качестве критерия для определения поврежденного присоединения использовать не интегральную величину J по (28), а знак и значение величины

$$VKF(t) = \int_0^T [d(3U_0(t)) / dt] \cdot 3i_0(t + \tau) d\tau, \quad (31)$$

соответствующей временной взаимной корреляционной функции совокупности мгновенных значений токов нулевой последовательности и скорости нарастания (производной) напряжения нулевой последовательности при выбранном параметре T .

Исследования на комплексных математических моделях «электрическая сеть – устройство защиты от ОЗЗ», созданных в системе MATLAB, показали, что выполнение защиты от ОЗЗ по способу, предложенному в [8], обеспечивает повышение устойчивости функционирования при значительных угловых погрешностях ТТНП и степени защищенности от влияния импульсных помех.

Следует отметить, что соотношения (8), (29) и (30) справедливы и для высших гармонических составляющих в установившемся режиме ОЗЗ. Поэтому при обеспечении требуемой чувствительности на основе способа [8] можно выполнить защиту, обеспечивающую селективность и высокую устойчивость функционирования как в переходных, так и в установившихся режимах ОЗЗ.

Заключение

На функционирование различных исполнений защит от ОЗЗ электрических сетей среднего напряжения 6–10 кВ существенное влияние оказывают значения токов и напряжений электромагнитных переходных процессов (амплитуды и интегральные значения) и их соотношения, частотные характеристики переходных токов и напряжений (спектр частот, амплитудно-частотные характеристики, энергетические характеристики) и фазовые соотношения электрических величин переходного процесса.

На основе решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ для упрощенной двухчастотной схемы замещения сети 6–10 кВ получены аналитические выражения для расчета среднеквадратичного значения переходного тока при однократном пробое изоляции и при дуговых прерывистых ОЗЗ по теориям Петерсена и Петерса и Слепяна.

Расчеты по полученным аналитическим выражениям, проверенные моделированием на ЭВМ,

показали, что даже при однократном пробое изоляции в сетях 6–10 кВ среднеквадратичное (эффективное) и средневыпрямленное значения контролируемого защитой тока может увеличиваться в 5–10 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что обуславливает существенное влияние переходных процессов на устойчивость функционирования ТЗНП и других защит от ОЗЗ.

При дуговых перемежающихся ОЗЗ среднеквадратичное (эффективное) и средневыпрямленное значения контролируемого защитой тока может увеличиваться в 10–15 раз по сравнению с установившимся режимом замыкания, что приводит к необходимости значительного заглубления большинства исполнений ТЗНП, ограничению их чувствительности и области возможного применения.

Применение ФНЧ с частотой среза около 300 Гц позволяет ограничить среднеквадратичное значение при дуговом перемежающемся ОЗЗ до значений, не превышающих среднеквадратичное значение установившегося тока замыкания на землю, т.е. обеспечивает эффективную отстройку ТЗНП с ИОТ, реагирующим на эффективное значение контролируемого тока, от влияния электромагнитных переходных процессов.

Для получения вышеописанного эффекта для ТЗНП с ИОТ, основанными на использовании средневыпрямленного значения контролируемого тока, необходимо применение ФНЧ с частотой среза около 500 Гц.

Основная часть энергии (более 90 %) свободных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ сосредоточена в спектральном диапазоне с верхней частотой $f = 3\text{--}4$ кГц, что позволяет ограничить рабочий диапазон частот и существенно упростить требования к защитам от ОЗЗ, основанным на использовании переходных процессов, на микропроцессорной базе.

Использование в качестве критерия для определения поврежденного присоединения интегральной величины, соответствующей временной взаимной корреляционной функции совокупности мгновенных значений токов нулевой последовательности и скорости нарастания (производной) напряжения нулевой последовательности, обеспечивает повышение устойчивости функционирования направленных защит от ОЗЗ, основанных на использовании переходных процессов, в условиях влияния угловых погрешностей ТТНП и импульсных помех.

Список литературы

1. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыкании на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.
2. Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3–35 кВ: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИЭ, 1994.
3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
4. Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 4.

5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1977.

6. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.

7. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Рейлиная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

8. Лачугин В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю // Энергетик. – 1997. – № 9. – С. 21.

9. Патент на изобретение № 2402131. Способ диагностики и направленной защиты от однофазных замыканий в электрических сетях / А.Л. Куликов, В.А. Шуин, А.А. Петрухин. Приоритет от 03.08.2009 г. Зарег. 20.10.2010 г.

Шуин Владимир Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-96-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru; vshuin@mail.ru

Ганджаев Дмитрий Ильгарович,
ОАО «Ивэлектроналадка»,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер по наладке и испытаниям 1-й категории, ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: rza@rza.ispu.ru

Сарбеева Ольга Александровна,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: sarbeeva_olga@mail.ru

Шагурина Елена Сергеевна,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: e_chugrova@mail.ru