

ПОДАВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ТРАНСФОРМАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ И УМЕНЬШЕНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ДМИТРИЕВ Е. В., докт. техн. наук ГАШИМОВ А. М.,
канд. техн. наук ПИВЧИК И. Р., инж. ГАСАНОВА С. И.

Институт физики НАН Азербайджана

При исследованиях перенапряжений в распределительном устройстве (РУ) с трансформатором напряжения (ТН) Армавирская подстанция 330 кВ возникли длительные феррорезонансные перенапряжения уровня $(1,5 \dots 1,6)U_{\text{фм}}$ с явно выраженными третьей и пятой гармониками. При восстановлении нормальной работы РУ появились такие же высокочастотные кумулятивные перенапряжения, как при коммутациях выключателями малых емкостных токов ненагруженной системы шин. В этом эксперименте использовался шестилучевой электронный осциллограф. Предстояло изучить вопрос о возникновении кумулятивных перенапряжений, чтобы решить проблему защиты от них. Настоящая статья посвящена разработке алгоритма к теоретическому анализу и выработке практических рекомендаций по предотвращению указанного явления с помощью устройства выявления и подавления феррорезонансных перенапряжений при их совмещении, т. е. использованию этого устройства для ограничения как феррорезонансных, так и коммутационных перенапряжений.

Для решения поставленной задачи выбрана расчетная схема из условия, что в РУ назначается один выключатель В, с помощью которого обеспечивается автоматическое повторное включение (АПВ) системы шин при аварийном отключении. Другие выключатели присоединений в АПВ не участвуют, но их емкостные делители остаются подключенными к системе шин, обеспечивая тем самым фактическое включение присоединений к этой системе

Расчетная схема представлена на рис. 1. На рисунке: $e_1(t)$, $e_2(t)$ – источники напряжения от присоединений системы шин; $e_3(t)$ – источник напряжения для подавления феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений; u_1 , u_T – мгновенные значения напряжения соответственно в точках соединения присоединений к системе шин и ввода ТН; u_2 , u_{μ} – мгновенные значения напряжения на схеме замещения ТН; l – расстояние по шинам между ТН и источником в пределах 200...500 м; L_1 , r_1 – параметры присоединения, выполняющие функцию АПВ; $C_{\text{в}}$ – суммарные емкости емкостных делителей выключателей; $C_{\text{ш}}$, C_T – суммарные емкости системы шин и ТН на землю; i_1 , i_2 , $i_{\text{ш}}$, i_c , i_{T1} , i_{μ} , i_{T2} , i_3 , $i_{\text{н}}$, i_k – мгновенные значения токов, протекающих через соответствующие элементы расчетной схемы; L_3 , r_3 – предвключенные индуктивность и сопротивление в цепи собственных нужд РУ; L_{T1} , L_{T2} – индуктивности обмоток высокого и низкого напряжений ТН; r_{μ} – активное сопротивление обмотки ТН. Принятые положительные направления токов и ЭДС показаны на рис. 1.

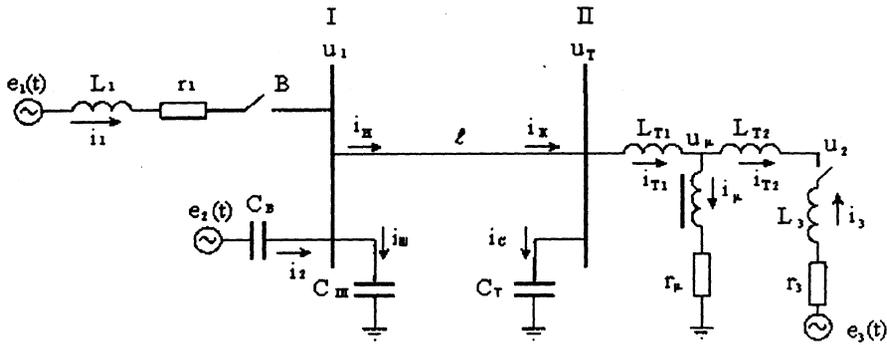


Рис. 1. Расчетная схема для компьютерного моделирования и анализа феррорезонансных и кумулятивных процессов в РУ с ТН и защитным устройством

Выбор данной расчетной схемы обусловлен тем, что узловые точки I и II с сосредоточенными параметрами разделены с помощью линии с распределенными параметрами. Такое разделение позволяет решить системы уравнений, описывающие исследуемые процессы с применением высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем [1].

Напряжения и токи в промежуточных точках линии между узловыми точками I и II определяются уравнениями линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и коронирования [2]:

$$(1 + G\gamma)u_d + (z + z_n)i_d = u_p + zi_p + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk}; \quad (1)$$

$$-(1 + G\gamma)u_d + (z + z_n)i_d = -u_q + zi_q - \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk},$$

где θ , G , γ – коэффициенты, учитывающие коронирование провода [3]; χ_k , i_{fk} – соответственно коэффициенты, учитывающие поверхностный эффект и токи в ветвях модели поверхностного эффекта [4]; z – волновое сопротивление линии; z_n – сопротивление, учитывающее поверхностный эффект.

Система уравнений (1) связывает неизвестные значения напряжения u_d и тока i_d в точке $d(x, t)$ с известными значениями напряжения и токов u_p , i_p ; u_q , i_q и i_{fk} в точках линии с координатами соответственно $(x - h, t - \tau)$, $(x + h, t + \tau)$; $(x, t - 2\tau)$; h – расстояние между точками $p - d$ и $q - d$; $h = v\tau$, где v – скорость распространения электромагнитной волны в линии без потерь; τ – шаг расчета по времени.

Для узловой точки I действительны следующие уравнения:

$$\frac{di_1}{dt} = L_1^{-1} [e_1(t) - r_1 i_1 - u_1];$$

$$\frac{du_1}{dt} = (C_b + C_{ш})^{-1} (C_b \omega U_{фм} \cos \omega t - i_{ш}); \quad (2)$$

$$e(t) = U_{\text{фм}} \sin \omega t,$$

где $e(t)$ – фазная ЭДС источника; $U_{\text{фм}}$ – максимальное значение фазного напряжения; $i_{\text{н}} = i_2 - i_{\text{ш}}$ при отключенном состоянии контактов выключателя В; $i_{\text{н}} = i_1 + i_2 - i_{\text{ш}}$ – при включенном состоянии контактов выключателя В. Ток $i_{\text{н}}$ в начале линии l определяется из выражения, полученного из расчетных разностных уравнений линии электропередачи (1) с учетом поверхностного эффекта в проводах и земле, коронирования проводов

$$i_{\text{н}} = (z + z_{\text{п}})^{-1} (v_q - u_1). \quad (3)$$

Здесь v_q – падение напряжения в начале линии, где $x = 0$, и определяется из значений тока и напряжения в начале линии на предыдущих шагах $(h, t - \tau)$ и $(t - 2\tau)$ расчета

$$v_q = -u_q(h, t - \tau) + z i_p(h, t - \tau) + \theta \gamma + z_{\text{п}} \sum_{k=1}^n \chi_k i_{\text{рк}}(t - 2\tau). \quad (4)$$

Система уравнений (2), (3) с логическими элементами управления зажиганием дуги между контактами выключателя В (при $L_1^{-1} \neq 0$) или погасанием (при $L_1^{-1} = 0$) универсальна, поэтому может использоваться для исследования феррорезонансных и высокочастотных кумулятивных перенапряжений.

Для узловой точки II действительны следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{T1}}{dt} &= L_{T1}^{-1} (u_T - u_{\mu}); \\ \frac{di_{T2}}{dt} &= L_{T2}^{-1} (u_{\mu} - u_2); \\ \frac{di_3}{dt} &= L_3^{-1} [e_3(t) - r_3 i_3 - u_2]; \\ \frac{d\psi}{dt} &= u_{\mu} - r_{\mu} i_{\mu}; \\ \frac{du_T}{dt} &= C_T^{-1} i_c; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\psi = \alpha \psi + b \psi^n + i \psi^m; \quad m > n,$$

где ψ – поток намагничивания трансформатора напряжения.

Нелинейные характеристики намагничивания трансформатора напряжения моделируются полиномом или сплайн-интерполяционным полиномом третьей степени, как было принято при моделировании вольт-амперной характеристики ограничителей перенапряжения и нелинейного резистора [5].

Ток i_k в конце линии l определяется по выражению

$$i_k = (z + z_n)^{-1} (v_p + u_T). \quad (6)$$

Здесь v_p – падение напряжения в конце линии, где $x = l$, определяемое из значений тока и напряжения в конце линии на предыдущих шагах ($l - h$, $t - \tau$), ($l, t - 2\tau$);

$$v_p = u_p(\ell - h, t - \tau) + z i_p(\ell - h, t - \tau) + \theta \gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk}(\ell, t - 2\tau). \quad (7)$$

Система уравнений (1), (5), (6), (7) с логическими элементами управления подключением источника $e_3(t)$ с предвключенными элементами L_3, r_3 от собственных нужд РУ также универсальна, поэтому может использоваться для исследования феррорезонансных и коммутационных перенапряжений как при их развитии, так и при предотвращении с помощью напряжения, подаваемого от источника собственных нужд РУ.

С учетом принятого положительного направления тока для i_c, i_μ, i_{T2} можно написать

$$i_c = i_k - i_T; \quad i_\mu = i_{T1} - i_{T2} \quad \text{или} \quad i_\mu = i_{T1} + i_3,$$

где $i_{T2} = -i_3$ при $L_3^{-1} \neq 0$; $i_{T2} = 0$; $i_{T3} = 0$ при $L_3^{-1} = 0$.

Для решения (2)–(7) совместно с расчетными уравнениями линии электропередачи (1), полученными при применении разностного метода второго порядка с постоянным шагом, был использован метод [1], позволяющий получить устойчивое решение. Для улучшения сходимости при высокочастотных переходных процессах показана целесообразность использования метода «предиктор–корректор» второго порядка [7]

$$Y_{i+1}^* = Y_i + 0,5h [Y(x_i, y_i) + Y(x_{i+1}, y_{i+1}^*)]. \quad (8)$$

Здесь Y_{i+1}^* – «грубое» значение Y_{i+1} . Для получения более корректного расчета переходных процессов в начальные моменты зажигания и погасания дуги между контактами выключателя и в момент включения источника $e_3(t)$ был использован метод Вегстейна [8]. Он необходим для уточнения значений Y_{i+1} в нескольких начальных точках расчетной сетки. В этом методе выражение для Y_{i+1} имеет следующий вид:

$$Y_{i+1} = Y_{i+1}^* - \left[(Y_{i+1}^* - Y_i^*) (Y_{i+1}^* - Y_i^*) \right] (Y_{i+1} + Y_i - Y_i + Y_{i-1}^*)^{-1}. \quad (9)$$

Использование изложенного алгоритма решения граничных уравнений с уравнениями линии электропередачи при исследованиях феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений базируется на разработанном алгоритме для расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей [9].

При анализе указанных перенапряжений в соответствии с изложенным алгоритмом решаются следующие взаимосвязанные этапы вычислительного процесса: рассчитываются напряжения и токи в I узловой точке в зави-

симости от начальных значений напряжений и токов предыдущего шага по времени $t - \tau$ и $t - 2\tau$ на линии l ; вычисляются напряжения и токи в промежуточных точках линии (рис. 2, область II) в момент $t + 2\tau$ в зависимости от значений напряжений и токов по времени $t - \tau$ и $t - 2\tau$; определяются напряжения и токи в III узловой точке в зависимости от напряжений и токов в узловой и конечной точках линии l по времени $t - \tau$ и $t - 2\tau$. С целью получения полной картины изменения напряжений и токов в узловых точках расчетной схемы при коммутации с помощью выключателя В и после подключения источника $e_3(t)$ в алгоритм или непосредственно в математическую модель вводятся дополнительные точки со своими выражениями для напряжений и токов. Тогда в расчетной сетке областей I и III вводятся дополнительные точки с учетом сохранения постоянства отношения h/τ . Значения напряжений и токов в дополнительных точках вычисляются с шагом τ/m , где m – число дополнительных точек по направлению x , т. е. расстояние между дополнительными точками равно h/m . В данном алгоритме в областях I и III введены одинаковые дополнительные точки. Возможно разбиение исходной области I и III на различные подобласти с разным количеством дополнительных точек, например для получения более полной картины изменения напряжений и токов в узловой точке III дополнительные точки вводятся между точками $(l - 4h, l)$.

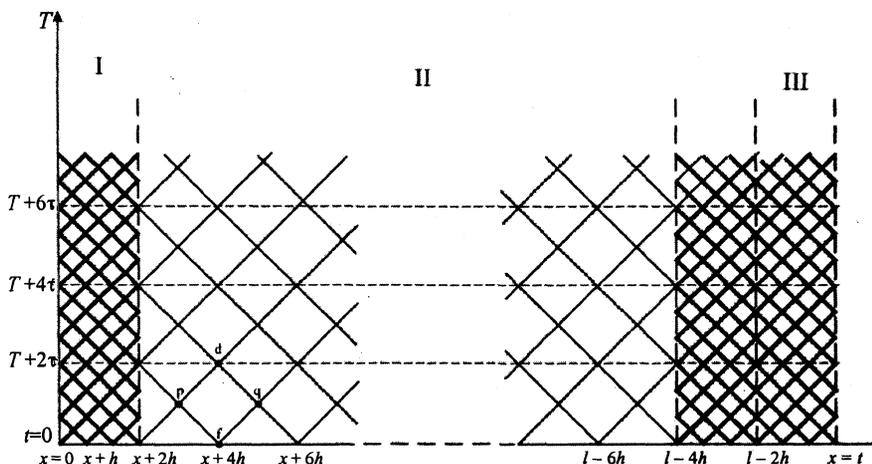


Рис. 2. Расчетная сетка с разбиением исходной области на подобласти при введении дополнительных точек

Расчеты феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений и их подавления выполнены для РУ 330 кВ с ТН НКФ-330 с учетом реальных параметров присоединений к системе шин и оборудования РУ. Для иллюстрации возможности предложенного алгоритма расчета и анализа феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений и их ограничения в одном расчетном процессе вначале схема, состоящая из источника электрической энергии, емкости емкостных делителей напряжения выключателей и системы шин, ТН и соединительной шины ТН с источником электрической энергии, подключается под напряжение. Развиваются феррорезонансные процессы и возникает перенапряжение с амплитудой $1,6U_{\text{фм}}$ (рис. 3).

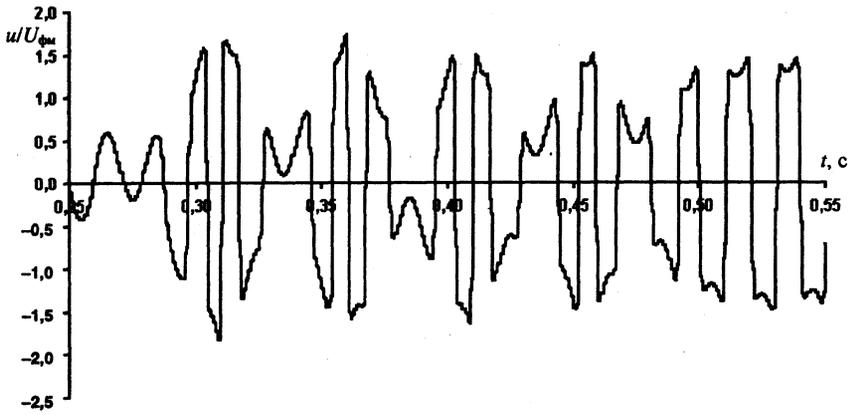


Рис. 3. Расчетная осциллограмма развития феррорезонансного процесса

Как видно из расчетной осциллограммы, переходные процессы продолжаются несколько периодов, а затем следует квазиустановившийся режим. Этим же алгоритмом проводят расчет подавления феррорезонансных перенапряжений.

Для исключения указанных феррорезонансных перенапряжений при образовании изложенного сочетания последовательности соединений элементов РУ рассмотрен способ предотвращения и подавления феррорезонанса, основанный на подаче напряжения на ТН от источника собственных нужд, находящегося вследствие феррорезонанса в противофазе с напряжением шин РУ. Расчетная осциллограмма процесса подавления феррорезонанса приведена на рис. 4 [10, 11].

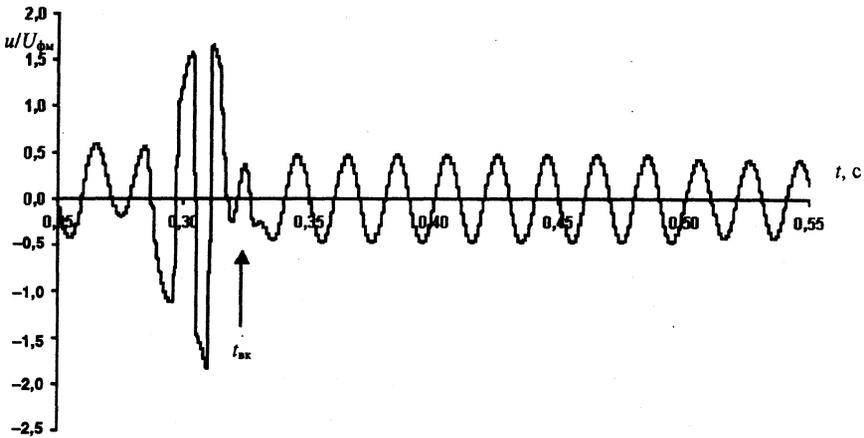


Рис. 4. Расчетная осциллограмма подавления феррорезонансного перенапряжения после его развития: $t_{вк}$ – момент включения $e_3(t)$

Видно, что феррорезонансное перенапряжение подавляется и максимальное значение установившегося напряжения на шине РУ равно $0,5U_{ФМ}$. Это соответствует расчетному значению $e_3(t)$, которое равно

$$e_3(t) = e_1(t) \frac{C_B}{C_B + C_\omega}$$

Источник напряжения $e_3(t)$ от собственных нужд РУ при расчете подключается к схеме в момент $t_{\text{вк}} = 0,314$ с от начала подключения схемы под напряжение, т. е. до момента $t_{\text{вк}}$, как только начинают развиваться феррорезонансные процессы. Это время при расчете выбрано с таким условием, чтобы автоматика успела выявить развитие феррорезонансного процесса и выработала команду для включения источника $e_3(t)$ от собственных нужд РУ. Изложенное как наиболее надежный способ подавления феррорезонанса было проверено расчетным путем в качестве ограничения кумулятивного перенапряжения при включении шин под напряжение одним из выключателей РУ, предназначенным для АПВ шин. Вначале проведены расчеты процесса включения системы шин РУ выключателем В под напряжение в отключенном состоянии $e_3(t)$ в момент $t_{\text{вк1}}$ (рис. 5). Величина высокочастотного перенапряжения при заданных параметрах схемы достигает $1,6U_{\text{фм}}$. В момент $t_{\text{от1}}$ происходит погасание дуги между контактами и начинается высокочастотный переходный процесс с восстановлением феррорезонансной схемы. При этом значение амплитуды перенапряжения достигает $3U_{\text{фм}}$. Приведенная расчетная осциллограмма соответствует процессу АПВ с одним пробоем или погасанием дуги между контактами выключателя В при их замыкании.

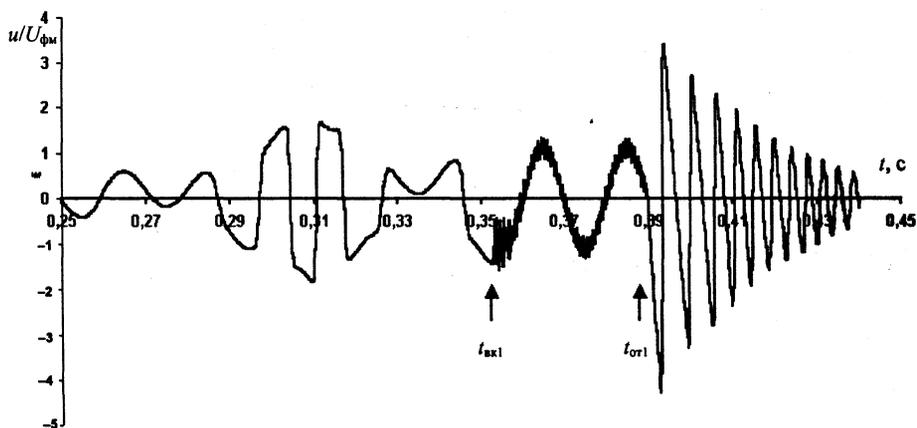


Рис. 5. Расчетная осциллограмма включения системы шин под напряжение при одном включении: $t_{\text{вк1}}$ – момент замыкания контактов выключателя В; $t_{\text{от1}}$ – момент погасания дуги между контактами

Это позволило получить хорошее совпадение результатов, полученных с помощью предложенного алгоритма, с реальным процессом, происходящим в указанных РУ. В таких случаях существует вероятность развития процесса с кумулятивным нарастанием амплитуды перенапряжения до определенного значения.

На основании одного включения и отключения в коммутационном режиме РУ с целью проверки работоспособности предложенного алгоритма были выполнены расчеты с двумя включениями и двумя отключениями при отключенном состоянии $e_3(t)$. Результаты расчета представлены на рис. 6.

На рисунке: $t_{\text{вк2}}$, $t_{\text{от2}}$, $t_{\text{вк3}}$, $t_{\text{от3}}$ равны расчетным моментам зажигания и погасания дуги между контактами выключателя В. Эти расчетные осцилло-

граммы можно принять как продолжение осциллограммы, представленной на рис. 5. При первом включении $t_{\text{вк}2}$ перенапряжение получается более $3U_{\text{фм}}$, при отключении в момент $t_{\text{от}2}$ перенапряжение достигает значения более $7U_{\text{фм}}$, при третьем включении в момент $t_{\text{вк}3}$ перенапряжение получается приблизительно $6U_{\text{фм}}$, при следующем отключении в момент $t_{\text{от}3}$ расчетное значение перенапряжения достигает 11-кратного фазного. Масштаб осциллограммы на рис. 6 выбран таким образом, чтобы четко выделить лишь амплитуды перенапряжений, сгладив при этом отдельные высокочастотные колебания.

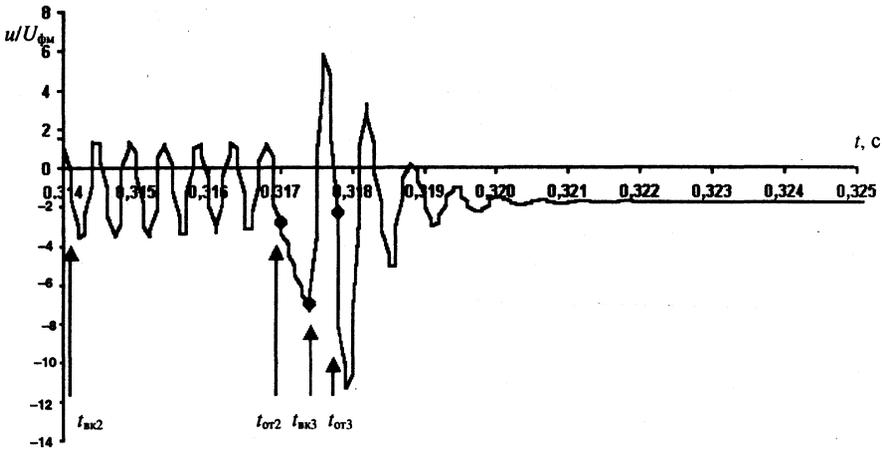


Рис. 6. Расчетная осциллограмма включения системы шин под напряжение при двух включениях и двух отключениях: $t_{\text{вк}2}$, $t_{\text{вк}3}$ – моменты замыкания (зажигания дуги); $t_{\text{от}2}$, $t_{\text{от}3}$ – моменты отключения (погасания дуги) контактов выключателя В

Таким образом, при избранном особом гипотетическом режиме расчета коммутационного процесса с АПВ при восстановлении напряжения на шинах РУ мы получили кумулятивное нарастание перенапряжения с восстановлением напряжения на шинах после аварийного отключения присоединений от системы шин РУ, и характер некоторых расчетных осциллограмм соответствует данным, полученным при экспериментальных исследованиях на РУ Армавирская подстанция 330 кВ.

В качестве решения, способного исключить кумулятивные нарастания перенапряжений, предложено использовать устройство выявления и подавления феррорезонансных перенапряжений с подачей напряжения на ТН от источника собственных нужд. При этом, как и при подавлении феррорезонансных процессов, к схеме подключается источник с напряжением $e_3(t)$. На рис. 7 приведена расчетная осциллограмма с исключением кумулятивных перенапряжений при одном повторном включении.

Моменты включения шин РУ под напряжение и погасания дуги между контактами выключателя соответствуют времени, указанному на рис. 4. Как видно, при подключении источника $e_3(t)$ после вхождения схемы в феррорезонансный режим при АПВ системы шин с ТН максимальное значение высокочастотного перенапряжения равно $1,5U_{\text{фм}}$, при погасании дуги между контактами перенапряжения отсутствуют, а напряжение на шине РУ кратковременным колебательным процессом восстанавливается. Здесь

вероятность повторного зажигания и погасания дуги резко уменьшается. В случае же повторных зажиганий и погасаний, при которых перенапряжение получается выше, чем при зажиганиях, кумулятивное нарастание перенапряжения тем не менее полностью исключается.

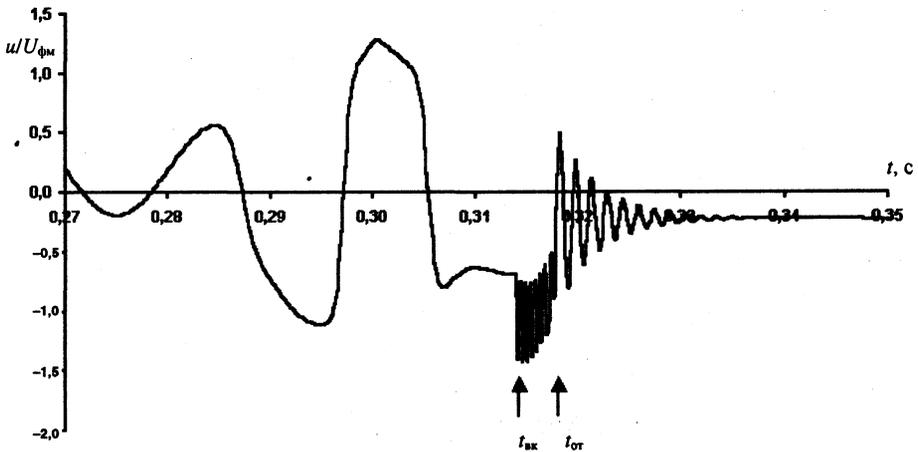


Рис. 7. Расчетная осциллограмма подавления кумулятивного перенапряжения: $t_{вк}$ – момент замыкания контактов выключателя В; $t_{от}$ – момент погасания дуги между контактами выключателя В

Таким образом, из полученных результатов следует, что если при АПВ системы шин или включении ненагруженной системы шин РУ возникнут перенапряжения, представляющие опасность для изоляции оборудования РУ, то защиту от них можно организовать с незначительными затратами. Для получения технических характеристик феррорезонансных и кумулятивных процессов, а также разработки защиты от них РУ с помощью компьютерного моделирования можно успешно использовать изложенный алгоритм расчета.

ВЫВОД

Предложен вычислительный алгоритм для численного эксперимента и компьютерного моделирования феррорезонансных и коммутационных перенапряжений и защиты от этих перенапряжений. Установлено, что для исключения возникновения опасных для изоляции электрооборудования и шин распределительного устройства перенапряжений, носящих кумулятивно нарастающий характер, можно совмещать защиту от феррорезонансных и коммутационных перенапряжений в едином комплексе мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Четверушкин Б. Н. Высокопроизводительные многопроцессорные вычислительные системы // Вестник РАН. – 2002. – Т. 72, № 9. – С. 786–794.
2. Джуварлы Ч. М., Дмитриев Е. В. Математическое моделирование волновых процессов в электрических сетях. – Баку: Элм, 1975. – С. 115.
3. Расчетные формулы для уравнений линий электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, Б. М. Садыхов // Техническая электродинамика. – 1991. – № 1. – С. 85–92

4. Дж у в а р л ы Ч. М., Д м и т р и е в Е. В., Г а ш и м о в А. М. Задачи математического моделирования в проблеме повышения надежности электрических сетей высокого напряжения // Изв. АН Азербайджана. – 1999. – № 6. – С. 128–133.

5. Д м и т р и е в Е. В., Г а ш и м о в А. М., А х м е д о в Х. М. Защита оборудования электрических подстанций от высокочастотных перенапряжений слабонелинейными резисторами // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 32–39.

6. Р у к о в о д я щ и е у к а з а н и я по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения. – Киев, 1995. – С. 28.

7. В о л к о в Е. А. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – С. 238.

8. Л а н с Дж. Н. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – С. 208.

9. А л г о р и т м расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливаемых напряжений между контактами выключателей / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, С. А. Рустамов // Техническая электродинамика. – 1995. – № 3. – С. 62–66.

10. А. с. 1786972 А СССР. Распределительное устройство / К. М. Антипов, А. М. Гашимов, Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, В. М. Максимов, А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – 1988.

11. П р е д о т в р а щ е н и е феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения, и предотвращение высокочастотных кумулятивных перенапряжений при включении ненагруженных шин выключателями / С. И. Гасанова, А. М. Гашимов, Е. В. Дмитриев, И. З. Пивчик // Проблемы энергетики. – 2002. – № 1–2. – С. 61–69.

Представлена лабораторией
физики и техники
высоких напряжений

Поступила 29.04.2003

УДК 681.511.4

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

**Канд. техн. наук, доц. ЛЕНЕВСКИЙ Г. С.,
асп. ОВСЯННИКОВ К. В.**

Могилевский государственный технический университет

При анализе широкого класса промышленных установок (буровые и подъемные установки, армирующие манипуляторы и т. д.), содержащих элементы с распределенными параметрами (тросы, канаты, штанги и другие упругие элементы), возникает необходимость получения математической модели установки с учетом зазора в соединительной муфте. Кроме этого, необходимо учитывать влияние упругого момента сопротивления в элементе с распределенными параметрами. Наличие нелинейности в модели, а также обратная связь по упругому моменту оказывают существенное