

**АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ,
СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

**Докт. техн. наук, проф. ДМИТРИЕВ Е. В., докт. техн. наук ГАШИМОВ А. М.,
инж. БАБАЕВА Н. Р.**

Институт физики НАН Азербайджана

Высокочастотные перенапряжения образуются при эксплуатационных и аварийных коммутациях ненагруженных шин распределительных устройств (РУ) и аппаратов. Каждая коммутационная операция с разъединителями холостых участков шин высоковольтных РУ сопровождается генерацией импульсов с амплитудой, несколько раз превышающей номинальное напряжение, и с частотами от 50 до 1000 кГц, которые совпадают с рабочим диапазоном частот высокочастотных заградителей и представляют для нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) большую опасность, так как последние не были рассчитаны на данные условия работы [1, 2].

В качестве средств защиты от перенапряжений на РУ, вызванных коммутациями разъединителей, предлагается использовать ОПН, нелинейные резисторы в цепи коммутации, высокочастотное деление шин продольными реакторами, регулирование емкости системы шин на землю, замену разрядника ОПН, изменение порядка коммутации [1, 3]; в элегазовых распределительных устройствах рекомендуется оптимизация межконтактного промежутка с учетом максимально возможных перенапряжений [4].

Изучение влияния ОПН на ограничение перенапряжений, вызванных коммутациями холостой системы шин, необходимо и с точки зрения решения задачи применения аппаратов с управляемой коммутацией. Как известно, самоуправляемые электрические аппараты считаются перспективными при решении задачи предотвращения перенапряжений, создания управляемой с помощью компьютера подстанции, проведении прогрессивного мониторинга и диагностики на такой подстанции, управления сроком службы оборудования и т. д. [3].

ОПН начинает работать (оказывать влияние), если напряжение превысит значение наибольшего длительно допустимого напряжения на нем. Он не влияет на переходный процесс при напряжении, ниже срабатывания ОПН, и не исключает высокочастотных колебаний. ОПН ограничивает перенапряжения до значения остающегося напряжения, определяемого током, протекающим через него, и не уменьшает вероятности возникновения поверхностных замыканий между контактами коммутационного аппарата.

Данная статья посвящена анализу влияния ОПН на электромагнитные высокочастотные перенапряжения при коммутациях разъединителями ненагруженных участков шин, необходимому для решения проблемы совмещения функций защиты и управления коммутаций цепей высокого напря-

жения, а также изучения возможности применения частотно-зависимого резистора при необходимости облегчения условий работы ОПН.

Работа выполнена как дополнение к проведенным исследованиям в области моделирования для численного эксперимента высокочастотных перенапряжений в высоковольтных РУ, с помощью которых можно получить осциллограммы высокочастотных перенапряжений и токов с учетом ОПН и частотно-зависимого резистора, облегчающего условия работы ОПН при использовании защиты, основанной на компьютерном моделировании. До настоящего времени вопросы исследования высокочастотных токов, определяющих требования к ОПН при коммутациях холостой системы шин и оборудования с разъединителями, использования частотно-зависимого резистора в цепях коммутации не рассматривались. В связи с этим изучение схемы для компьютерного моделирования высокочастотных перенапряжений, основанной на апробированном алгоритме расчета волновых процессов, разработанном Институтом физики НАН Азербайджана, установка ОПН и частотно-зависимого резистора представляются эффективными и целесообразными.

Расчетная схема выбрана в соответствии с [5] и представлена на рис. 1, где z_3 – эквивалентное волновое сопротивление отходящих от шин линий; r_T, l_T – параметры источника; $r_{q,p}$ – частотно-зависимое сопротивление; l_1, l_2 – длины шин до и после разъединителя; $e(t)$ – фазная ЭДС источника; $u_c, u_{н1}$ – мгновенные значения напряжения на питающей стороне шин; $u_{k1}, u_{н2}$ – мгновенные значения напряжения на разъединителе соответственно с питающей и холостой сторон шин; u_{k2} – мгновенное значение напряжения на конце холостой шины; $i_{н1}, i_{k1}, i_{н2}, i_{k2}, i_{ОПН1}, i_{ОПН2}$ – мгновенные значения токов, протекающих через соответствующие элементы расчетной схемы.

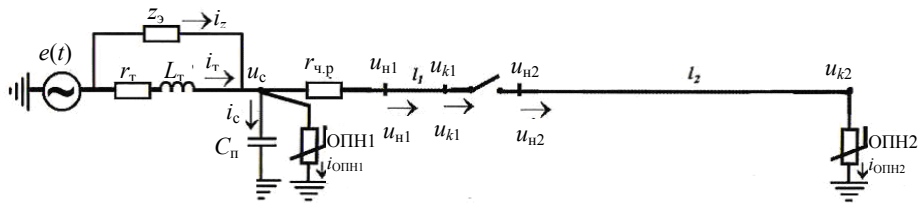


Рис. 1. Расчетная схема для компьютерного моделирования и анализа высокочастотных процессов с ОПН и частотно-зависимым резистором

Для расчетной схемы можно записать систему уравнений, описывающих электромагнитные процессы в сосредоточенных элементах на питающей стороне:

$$\begin{aligned} \frac{di_T}{dt} &= L_T^{-1} e(t) - r_T i_T - u_c ; \\ \frac{du_c}{dt} &= C_n^{-1} i_c ; \\ i_c &= i_T + i_z - i_{н1} - i_{ОПН1} ; \\ i_z &= z_3^{-1} e(t) - u_c ; \\ i_{ОПН1} &= f(u_c). \end{aligned} \quad (1)$$

Волновые процессы на элементах с распределенными параметрами (участки шин) длиной l_1, l_2 описываются расчетными разностными уравнениями линий электропередачи с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах и коронирования проводов линии [5]:

$$\begin{aligned} u_d - u_p + z(i_d - i_p) + h \left[z\varphi \left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e \right) + f \left(\frac{\partial i_e}{\partial t}, i_e \right) \right] &= 0; \\ -u_d + u_q + z(i_d - i_q) + h \left[f \left(\frac{\partial i_e}{\partial t}, i_e \right) - z\varphi \left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e \right) \right] &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $z = (L_0 C_0^{-1})^{-0,5}$ – волновое сопротивление линии без потерь; $u_d, u_p, u_q, u_e, i_d, i_p, i_q, i_e$ – напряжения и токи в точках рассматриваемой области ($x = 0, x = 1, t = 0$ и открытой в направлении t) решения системы уравнений многопроводной линии с координатами соответственно $(x, t), (x - h, t - \tau), (x + h, t - \tau), (x, t - \tau)$; h, τ – пространственная и временная переменные, отношение которых определяет расчетный шаг; $f \left(\frac{\partial i_e}{\partial t}, i_e \right); \varphi \left(\frac{\partial u_e}{\partial t}, u_e \right)$ – функции, учитывающие соответственно поверхностный эффект в земле и проводах и коронирование проводов линии.

Система уравнений (2) связывает неизвестные значения напряжения u_d и тока i_d в точке $d(x, t)$ с известными значениями напряжений u_p, u_q и токов i_p, i_q в точках линии $p(x - h, t - \tau)$ и $q(x + h, t - \tau)$ и позволяют вычислить напряжения u_d и токи i_d .

Для получения достоверных результатов при численном анализе высокочастотного перенапряжения с учетом ОПН необходимо моделировать его характеристики как с учетом, так и без учета петлеобразной вольт-амперной характеристики, с точки зрения правильного выбора расчетного алгоритма. Если учитывать петлеобразный характер вольт-амперной характеристики ОПН, то можно использовать расчетную схему ОПН, рекомендованную IEEE [6], или упрощенную модель, приведенную в [7, 8]. В [8] показано, что эти модели пригодны при ограничении как грозových, так и коммутационных перенапряжений. Однако задачу определения параметров элементов модели ОПН при высокочастотных перенапряжениях нельзя считать решенной, так как отсутствуют экспериментальные данные, а также четко выраженные вольт-амперные характеристики ОПН, соответствующие изучаемому процессу. В этом случае для проверки правильного выбора параметров ОПН была использована модель ОПН, представленная на рис. 2 [6, 9].

В этом случае для узловой точки, в которой подключен ОПН на питающей стороне, система уравнений (1) дополняется следующими уравнениями:

$$\frac{di_1}{dt} = L_0^{-1} u_c - r_{A_1} i_1 ;$$

$$u_{н1} = u_c - r_{ч.п} i_{н1} ;$$

$$i_{\text{ОПН1}} = i_0 + i_1; \quad (3)$$

$$i_{\text{н1}} = z + z_n^{-1} u_{\text{н1}} + r_{\text{ч.р}} i_{\text{н1}} + \nu_q;$$

$$u_{\text{с}} = r_{A_0} i_0; \quad u_{A_1} = A_1 i_1^\alpha; \quad r_0 = A_0 |i_0|^{\alpha-1}.$$

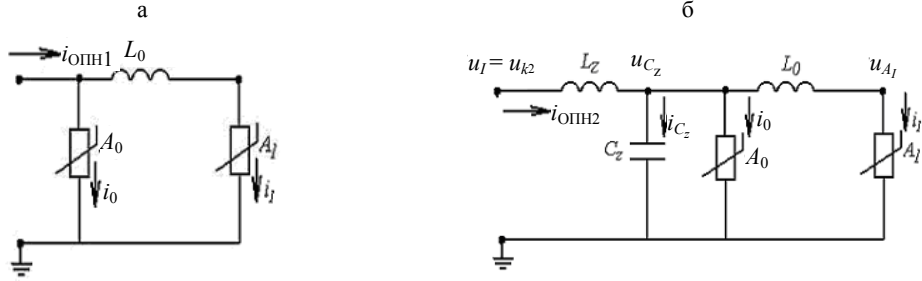


Рис. 2. Расчетная схема для моделирования характеристик ОПН: а – упрощенная модель ОПН для узловой точки на питающей стороне; б – модель ОПН для узловой точки на стороне холостой системы шин

Для получения расчетных кривых напряжений и токов на конце холостой системы шин, где предусматриваются варианты с учетом ОПН и без него, уравнения записываются в следующем виде:

$$\frac{di_{\text{ОПН2}}}{dt} = L_z^{-1} (u_{k2} - u_{C_z});$$

$$\frac{du_{C_z}}{dt} = C_z^{-1} i_{C_z};$$

$$\frac{di_1}{dt} = L_0^{-1} (u_{C_z} - u_{A_1}); \quad (4)$$

$$i_{\text{ОПН2}} = i_{C_z} + i_0 + i_1;$$

$$u_{C_z} = A_0 i_0^\alpha; \quad u_{A_1} = A_1 i_1^\alpha;$$

$$u_{k2} = \nu_p - z + z_n i_{\text{ОПН2}};$$

$$\frac{u_{C_z}}{i_0} = A_0 |i_0|^{\alpha-1} \quad \text{или} \quad r_0 = A_0 |i_0|^\alpha,$$

где r_{A_1} , r_{A_0} – мгновенные значения сопротивлений A_1 и A_0 ; ν_p – коэффициент, который определяется из уравнений (3), (4), для питающей и для конца линии [7–9]; ν_q , $(z + z_n)$ – коэффициенты, определяемые из уравнения многопроводной линии.

Падения напряжения на сопротивлениях A_0 и A_1 могут быть записаны в виде:

$$u_{A_0} = A_1 |i_0|^{\alpha-1} i_0; \quad (5)$$

$$u_{A_1} = u_{C_z} = A_0 |i_1|^{\alpha-1} i_1. \quad (6)$$

Для мгновенного значения этих сопротивлений можно получить следующие выражения:

$$r_{A_1} = A_1 |i_1|^{\alpha-1}; \quad (7)$$

$$r_{A_0} = A_0 |i_0|^{\alpha-1}. \quad (8)$$

Мгновенные значения тока i_0 и напряжения u_2 имеют следующий вид:

$$i_{0_{n+1}} = u_{C_z} A_0 |\bar{i}_{0n}|^{\alpha-1}; \quad (9)$$

$$u_{2_{n+1}} = r_{A_1} i_1; \quad (10)$$

$$\bar{i}_{0_{n+1}} = i_{0_{n+1}} - \frac{i_{0_{n+1}} - i_{0_n} \quad i_{0_{n+1}} - \bar{i}_{0_n}}{i_{0_{n+1}} - i_{0_n} - \bar{i}_{0_n} + i_{0_{n-1}}}; \quad (11)$$

$$\bar{u}_{0_{n+1}} = u_{0_{n+1}} - \frac{u_{0_{n+1}} - u_{0_n} \quad u_{0_{n+1}} - \bar{u}_{0_n}}{u_{0_{n+1}} - u_{0_n} - \bar{u}_{0_n} + u_{0_{n-1}}}, \quad (12)$$

где $\bar{i}_{0_{n+1}}$ – уточненное значение тока через сопротивление A_0 ; $\bar{u}_{0_{n+1}}$ – уточненное значение напряжения u_{C_z} при расчетном шаге $n + 1$.

Значения тока i_0 и напряжения u_{C_z} вычисляются по (5–10) и уточняются по (11), (12) в соответствии с методом Хорда с уточнением Вегстейна [10].

При исследовании высокочастотного перенапряжения в качестве примера взята сеть 220 кВ и как базовый ОПН принят ОПН-220 кВ с остающимся напряжением при токе 420 А не более 355 кВ, при токе 100 А не более 243 кВ, уровни ограничения перенапряжения $1,8U_{\phi}$. Отношение $U_{\phi}/U_{100} \leq 0,6$, показатель нелинейности $\alpha = 0,05-0,1$. Параметры для модели ОПН в рассматриваемом примере в соответствии с [6–9] равны: $L_z = 0,1$ мГн; $L_0 = 0,1$ мГн; $C = 84,4$ пФ; $A_0 = 0,86$; $A_1 = 0,77$ при $i_{\text{ОПН1}} = 0,01$ кА; $A_0 = 0,94$; $A_1 = 0,81$ при $i_{\text{ОПН1}} = 0,1$ кА; $A_0 = 1,2$; $A_1 = 0,82$ при $i_{\text{ОПН1}} = 1$ кА. В качестве иллюстрации возможности изложенного алгоритма приняты расчетные длины $l_1 = 70$ м; $l_2 = 40; 120; 240; 360$ и 720 м. Рассмотрены варианты $C_{\text{п}}/C_{\text{х}} = 0,1; 0,3; 0,6; 0,9$ и $1,8$. Алгоритм построен таким образом, что при одновременном замыкании или размыкании всех трех контактов разъединителя с остаточными зарядами на линии l_2 соблюдаются следующие последовательности:

- 1) $i_{\text{ОПН1}} = 0$ при $u_c < U_{\text{срmax}}$; $i_{\text{ОПН2}} = 0$ при $u_1 < U_{\text{срmax}}$;
 2) $i_{\text{ОПН1}} \neq 0$ при $u_1 > U_{\text{срmax}}$; $i_{\text{ОПН2}} \neq 0$ при $u_1 > U_{\text{срmax}}$,

где $U_{\text{срmax}}$ – максимальное фазное напряжение срабатывания, в нашем примере $U_{\text{срmax}} = 207$ кВ. При осуществлении коммутации по фазному включению в зависимости от положения контактов подключение ОПН к расчетной схеме выбирается таким образом, чтобы выполнялись условия его срабатывания, т. е. $u_c > U_{\text{срmax}}$ и $u_1 > U_{\text{срmax}}$. В данном примере принят остаточный заряд на стороне линии l_2 , соответствующий потенциалам $U_{\text{н2A}} = -126$ кВ; $U_{\text{н2B}} = 63$ кВ; $U_{\text{н2C}} = 63$ кВ; включение происходит при напряжении питающей линии $U_{\text{k1A}} = 180$ кВ; $U_{\text{k1B}} = -90$ кВ; $U_{\text{k1C}} = -90$ кВ.

Предлагаемый алгоритм позволяет осуществить два различных типа компьютерных моделей для анализа высокочастотных перенапряжений с учетом и без учета петлеобразного характера вольт-амперной характеристики ОПН. Модели ОПН с учетом петлеобразного характера вольт-амперной характеристики ОПН предназначены не столько для ограничения перенапряжений, сколько для существенного улучшения адекватности алгоритма роста высокочастотных перенапряжений при применении компьютерной модели.

Обсуждение полученных результатов расчета. Кривые напряжений и токов при коммутации холостой системы шин, полученные путем компьютерного моделирования, показаны на рис. 3, 4. Здесь высокочастотные перенапряжения на конце шины ($l_2 = 120$ м) на фазе *A* достигают без ОПН более трехкратного значения (рис. 3в), ток в начале шины – более 1000 А; на этих же рисунках показаны и напряжения в начале шины (фаза *A*) и в конце шины (фаза *B*). Как видно, высокочастотные перенапряжения имеют достаточно высокие амплитуды, что с точки зрения процесса, связанного с открытыми дугами, представляет опасность. На рис. 3 приведены также результаты расчета при наличии ОПН, условно включенного на конце шины (линия $l_2 = 120$ м) с уровнем ограничения $1,8U_{\text{фmax}}$. Как видно, при наличии ОПН на конце линии в начальных периодах получается как режим короткого замыкания линии. При этом ток $i_{\text{нA}}$ имеет амплитуду около 1000 А и быстро затухает. Ток через ОПН имеет определенную форму, показанную на рис. 3и, и не исключает протекания заряда до очередного повторного зажигания дуги между приближающимися контактами разъединителя.

На рис. 4 приведены результаты компьютерного моделирования при наличии ОПН в начале и в конце холостой системы шин. Как видно, высокочастотное перенапряжение на фазе *A*, где остаточный заряд соответствует потенциалу -126 кВ, а действующее значение напряжения в момент включения равно 146 кВ, ограничивается на уровне $1,8U_{\text{ф}}$ и содержит высокочастотные составляющие. Ток на конце шины и через ОПН тоже содержит высокочастотные составляющие. Эти составляющие, естественно, с одной стороны, облегчают затухание дуги между контактами, с другой – увеличивают число зажигания и погасаний дуги при одном цикле коммутации.

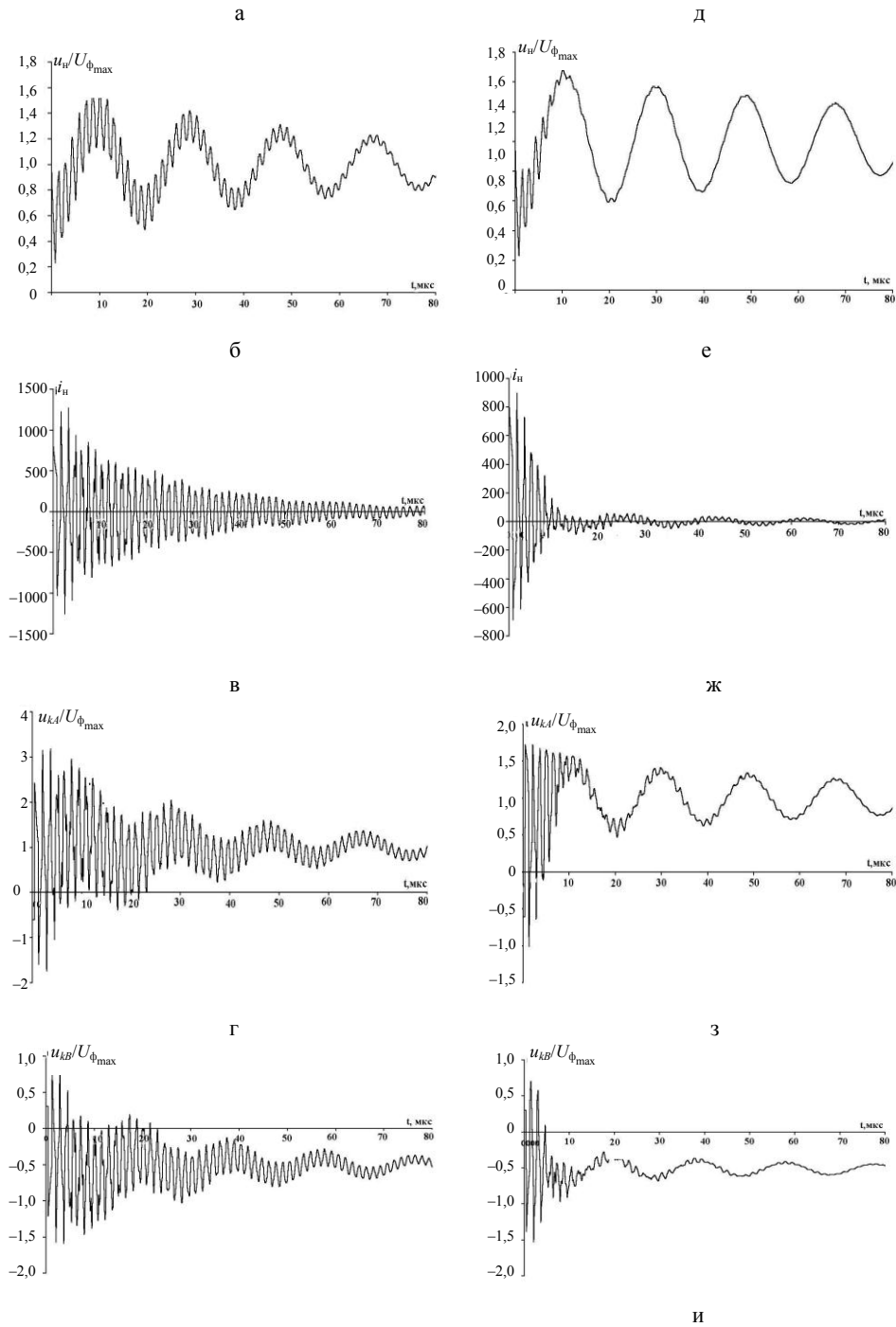


Рис. 3. Расчетные кривые напряжений и токов при коммутации разъединителем холостого участка системы шин (длина шин $l_2 = 120$ м): без ОПН (а, б, в, г) и с ОПН на конце шины (д, е, ж, з, и); а, д – напряжение в начале холостой шины; б, е – начальный ток; в, ж – напряжение в конце шины фазы *A*; г, з – напряжение в конце шины фазы *B*; и – фазный ток через ОПН

Для уменьшения высокочастотных составляющих с целью снижения повторных зажиганий и погасаний дуги между контактами в цепи введено частотно-зависимое сопротивление [11], характеристики которого моделированы в соответствии с алгоритмом, изложенным в [12]. Введение частотно-зависимого сопротивления существенно не влияет на амплитуды ограниченных перенапряжений и токов, так как параметры выбраны таким образом, что способствуют только снижению амплитуды высокочастотных составляющих. Формы кривых, полученных из расчета с учетом частотно-зависимого резистора при наличии ОПН, аналогичны кривым, которые представлены на рис. 4, и поэтому не приведены здесь.

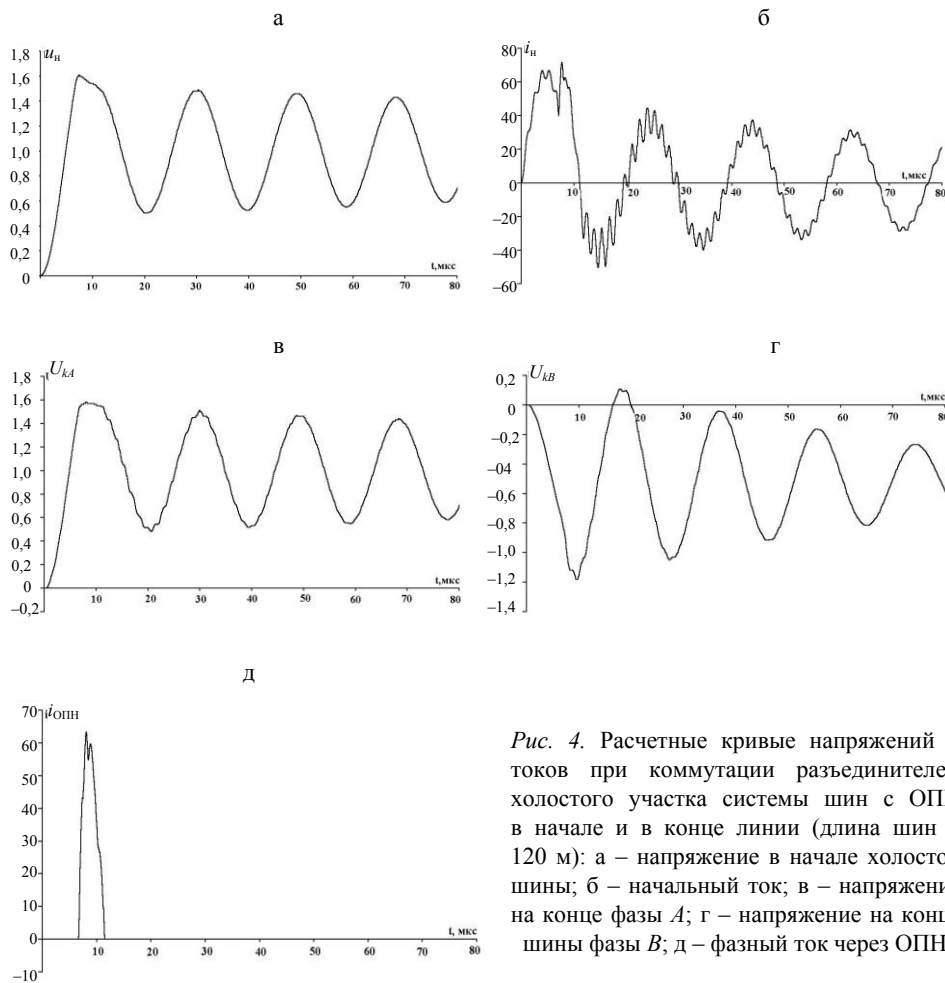


Рис. 4. Расчетные кривые напряжений и токов при коммутации разъединителем холостого участка системы шин с ОПН в начале и в конце линии (длина шин – 120 м): а – напряжение в начале холостой шины; б – начальный ток; в – напряжение на конце фазы *A*; г – напряжение на конце шины фазы *B*; д – фазный ток через ОПН

Проведенные исследования показали, что при изменении длины системы шин на стороне холостого участка шин, оставляя неизменными длины шин на стороне питания (в данном примере $l_1 = 40$ м) без учета ОПН, кратности перенапряжения в начале и конце шины с увеличением отношения $C_n/C_{\text{п}}$ приближаются (емкость C_n имитирует длину холостой системы шин, для класса напряжения 220 кВ она равна $7,6 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), с учетом ОПН они практически одинаковы (рис. 5).

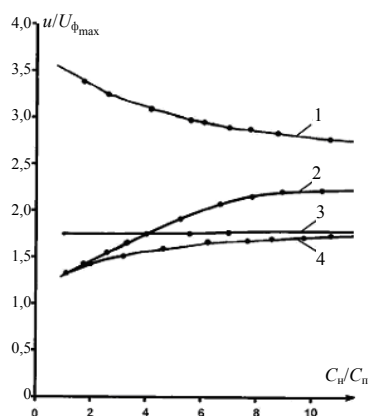


Рис. 5. Расчетные кривые напряжений с учетом и без учета ОПН: 1, 2 – напряжения соответственно в конце и в начале холостой шины; фаза *A* без учета ОПН; 3, 4 – напряжения соответственно в конце и в начале холостой шины; фаза *A* с учетом ОПН; $C_H, C_Π$ – емкость на питающей стороне и на стороне холостой системы шин

В табл. 1 приведены полученные результаты при разных соотношениях $C_H/C_Π$ (напряжения и токи с учетом и без учета ОПН). В правой части табл. 1 приведены параметры высокочастотных перенапряжений при наличии ОПН и частотно-зависимого сопротивления.

Таблица 1

Без ОПН						С ОПН				
$C_H/C_Π$	l	$u_{нA}/U_{φmax}$	$u_{кA}/U_{φmax}$	$i_{н}, A$	$u_{кB}/U_{φmax}$	$u_{нA}/U_{φmax}$	$u_{кA}/U_{φmax}$	$i_{н}, A$	$I_{ОПН}, A$	$u_{кB}/U_{φmax}$
0,1	40	1,3	3,4	1275	1,7	1,31	1,75	780	290	-1,49
0,3	120	1,6	3,25	1265	1,65	1,5	1,75	900	270	-1,55
0,6	240	2	3	1250	1,55	1,55	1,76	1100	320	-1,6
0,9	360	2,2	2,9	1200	1,5	1,7	1,78	1000	400	-1,48
1,8	720	2,25	2,6	700	1,3	1,8	1,78	700	300	-1,35

ВЫВОДЫ

Частотно-зависимое сопротивление не влияет на величину тока, так как в начальный момент, как было отмечено, получается режим короткого замыкания при наличии ОПН с частотой, близкой к номинальной. Поэтому следует рассматривать варианты выбора характеристики ОПН с учетом высокочастотного перенапряжения и тока через ОПН. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации:

- для защиты системы шин и оборудования от высокочастотных перенапряжений при наличии ОПН с применением перспективного метода защиты необходима предварительная апробация, которая легко осуществляется предложенным алгоритмом;
- использование частотно-зависимого сопротивления в цепи коммутации облегчает условия работы ОПН и тем самым повышает надежность РУ;

• при компьютерном моделировании защиты необходимо учесть характеристики ОПН с помощью схемы, предложенной IEEE, и его модификации в зависимости от режима и места расположения на исследуемой узловой точке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше / Б. И. Ковалев [и др.]. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 26 с.
2. Шляхов, С. С. Перенапряжения в высокочастотных заградителях / С. С. Шляхов, Г. С. Чирков, А. М. Макаров // Электрические станции. – 2003. – № 9. – С. 52–59.
3. Белкин, Г. С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих «интеллектом») для коммутации цепей высокого напряжения / Г. С. Белкин // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 3–9.
4. Явления, связанные с коммутированием емкостных токов разъединителями, встроенными в КРУЭ: доклад на сессии СИГРЭ-1982 / Босотти [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1985. – С. 139–154.
5. Дмитриев, Е. В. Защита оборудования электрических подстанций от высокочастотных перенапряжений слабонелинейными резисторами / Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов, Х. М. Ахмедов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 32–39.
6. IEEE W.3.4.11. Of Surge Protection Devices Committee, Modeling of Metal Oxide Surge Arresters // IEEE Trans. Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 301–309.
7. Mardira, K. A Simplified Lightning Model for Metal oxide Surge Arrester, Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference / K. Mardira, T. K. Saha. – Melbourne, Australia-29, 3 September, October, 2002.
8. Кадомская, К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учеб. / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхерд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
9. Fernández, F. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations, IPST 2001 / F. Fernández, R. Díaz. – Rio de Janeiro, Brasil.
10. Ланс, Дж. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин / Дж. Ланс. – М., 1962. – 208 с.
11. Hashimov, A. M. The electric and heat characteristics of frequency-dependent resistor / A. M. Hashimov, T. R. Mehdiyev, N. R. Babayeva // Fizika. – 2006. – Vol. XII, № 4. – P. 28–32.
12. Гашимов, А. М. Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений при использовании частотно-зависимого резистора: сб. докл. / А. М. Гашимов, Т. Р. Мехтиев, Н. Р. Бабаева // Энергетика Молдовы. – 2005. – С. 265–269.

Представлена лабораторией
физики и техники высоких напряжений

Поступила 5.05.2007