УДК 621.311

ОГРАНИЧЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ И КУМУЛЯТИВНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫМИ РЕЗИСТОРАМИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ТРАНСФОРМАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

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

О совмещении защиты от феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений. В электрических сетях высокого напряжения (110–750 кВ) одними из важнейших причин возникновения перенапряжений, приводящих к повреждению электрооборудования и срыву электроснабжения, являются феррорезонансные и коммутационные процессы в цикле автоматического повторного включения (АПВ) холостых шин.

Феррорезонансные перенапряжения возникают в распределительных устройствах (РУ) с электромагнитными трансформаторами напряжения (ТН) при наличии выключателей, в том числе и элегазовых, укомплектованных емкостными делителями напряжения. Коммутационные процессы с повторными пробоями при одном цикле АПВ шин с целью восстановления их нормальной работы вызывают кумулятивно нарастающие высокочастотные перенапряжения. Феррорезонансные процессы, возникающие в сетях с нелинейными элементами, сопровождаются искажениями формы напряжений и токов в цепях, на которые влияют не только начальные условия, но и приложенное напряжение и электромагнитные связи фаз. Восстановление нормальной работы при искажениях напряжений и токов АПВ сопровождается значительными повышениями напряжения, носящими кумулятивный характер.

При исследованиях феррорезонансных процессов и их предотвращении с применением устройства фиксации и подавления феррорезонанса и коммутации выключателями малых емкостных токов ненагруженных систем шин были заложены основы совмещения решения защиты от феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений в едином устройстве, которое должно обеспечить надежность распределительных устройств [1].

Совмещение защиты от феррорезонансных и кумулятивных коммутационных перенапряжений требует комплексного подхода в области как исследования, так и разработки устройств защиты с использованием современной вычислительной техники, компьютерного моделирования. Большое значение в этом направлении имеют совершенствование и разработка метода и алгоритма анализа сложных электрических цепей, содержащих нелинейные элементы, как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами.

Для защиты от феррорезонансных перенапряжений разработаны и применены исключающие их способы и средства, наиболее эффективными из

которых являются использование балластного резистора и подключение постороннего источника напряжения к ТН для размагничивания его сердечника [2].

Для уменьшения высокочастотных коммутационных перенапряжений предложены увеличение емкости системы, использование линейного или нелинейного бетэловых резисторов и др. [3, 4].

Однако осуществление этих мероприятий в действующих энергосистемах в данный момент по известным причинам задерживается. Поэтому возникли предложения о совмещении способов защиты от феррорезонансных перенапряжений и перенапряжений при включении системы шин РУ в едином устройстве, что представляется возможным в том случае, если защиты построены на базе современной компьютерной техники. Для дополнения действующих защитных устройств компьютерной техникой требуется, в первую очередь, разработка соответствующей математической модели и алгоритма этих процессов с учетом выбранных защитных устройств.

Данная статья посвящена разработке математической модели и алгоритма опознания и вычисления феррорезонансных перенапряжений, а также кумулятивных перенапряжений при АПВ шин РУ с ТН в процессе их подавления слабонелинейными резисторами.

Расчетная схема и уравнения анализа перенапряжений с учетом слабонелинейного резистора. Расчетная схема, представляющая возможные случаи феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений при АПВ холостых шин в РУ с ТН, приведена на рис. 1.

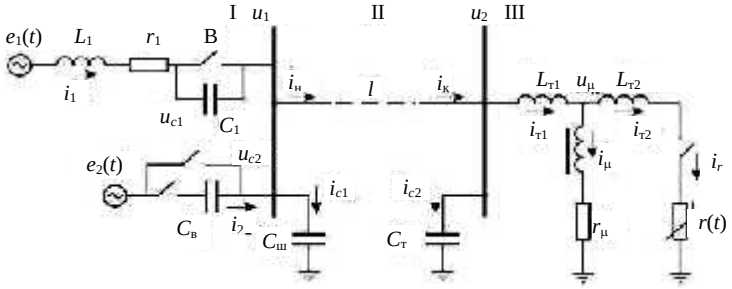

Рис. 1. Расчетная схема для компьютерного моделирования феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений

На схеме представлены: источники питания $e_1(t) = e_2(t) = U_{фм} \sin\omega t$, емкости емкостных делителей выключателей $C_в$ и C_1; емкости системы шин и оборудований на землю $C_ш$ и $C_т$, индуктивности и сопротивление ТН $L_{т1}$, $L_{т2}$ и $r_ц$, длина шин l до ТН в виде распределенного параметра, коммутирующий выключатель В, параметры присоединения L_1, r_1, участвующие в цикле АПВ, токи i_1, i_2, $i_н$, i_k, $i_{т_1}$, $i_{т_2}$, $i_ц$ и i_r, протекающие в соответствующих ветвях схемы с положительно принятыми направлениями, нелинейное сопротивление $r(t)$, подключенное на низкой стороне ТН.

Системы уравнений для узлов I, II и III записываются по последовательности, соответствующей узлам, приведенным к стороне высокого

напряжения ТН. Это позволяет построить алгоритм в следующей последовательности:

• определяются напряжения и токи в узле I. При вычислении феррорезонансных процессов принимается, что $L_1^{-1} = 0$, при расчете коммутационных процессов: $L_1^{-1} \neq 0;\ C_{\text{в}}^{-1} = 0$;

• определяются напряжения и токи в промежуточных точках линии l – II узел. При вычислении исходный расчетный шаг выбирается из условия

$$h = v\tau,$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны в линии без потерь; h, τ – постоянные по осям времени и расстояния;

• определяются напряжения, токи, поток намагничивания ТН и значение нелинейного сопротивления $r(t)$ – III узел. При вычислении напряжения, тока и потока намагничивания ТН без $r(t)$ принимается, что $L_{T_2}^{-1} = 0$;

• выбирается момент коммутации и введения в цепь нелинейного сопротивления $r(t)$. При адаптации исходной и измененной цепи исследования к обработке и вычислению как продолжению выполненных ранее расчетов осуществляется сужение расчетной сетки для обеспечения сходимости итерационного процесса вычисления значения сопротивления $r(t)$ в данный момент расчета.

Для узловой точки I можно записать:

$$\begin{gathered}
\frac{di_1}{dt} = L_1^{-1}\left[e_1(t) - r_1 i_1 - u_{c1} - u_1\right]; \\
\frac{du_{c1}}{dt} = C_1^{-1} i_1 \ \text{при}\ C_1^{-1} \neq 0;\ i_1 \neq 0; \\
\frac{du_{c2}}{dt} = C_{\text{в}}^{-1} i_2 \ \text{при}\ C_{\text{в}} = 0;\ \ i_2 = 0; \\
\frac{du_1}{dt} = C_{\text{ш}}^{-1} i_{c1},
\end{gathered} \tag{1}$$

где

$$\begin{gathered}
e_2(t) = u_{c2} + u_1; \\
i_{\text{н}} + i_{c1} = i_1 + i_2,
\end{gathered}$$

где $i_{\text{н}}$ – ток в начале линии, определяется с учетом уравнения линии электропередачи.

Уравнения линии электропередачи для узла II с учетом поверхностного эффекта и короны при численных расчетах волновых процессов описываются разностными выражениями [5]:

$$\begin{gathered}
u_d - u_p + z(i_d - i_p) + h\left[z\varphi\left(\frac{\partial u_c}{\partial t} i_c\right) + f\left(\frac{\partial i_c}{\partial t} i_c\right)\right] = 0; \\
u_c + u_q + z(i_d - i_q) + h\left[f\left(\frac{\partial i_c}{\partial t} i_c\right) - z\varphi\left(\frac{\partial u_c}{\partial t_1} i_c\right)\right] = 0,
\end{gathered} \tag{2}$$

где $z = (L_0 C_0^{-1})^{0,5}$ – волновое сопротивление; L_0, C_0 – геометрическая индуктивность и емкость линии; u_d, u_p, u_q, u_c, i_d, i_p, i_q, i_c – напряжения и токи в точках решаемой области $x = 0$, $x = l$, $t = 0$ и открыто в направлении t с координатами соответственно (x, t), ($x - h$, $t - \tau$), ($x + h$, $t - \tau$), (x, $t - \tau$); l, h, τ – пространственная и временная переменные, $\tau = (L_0 C_0)^{0,5} h$; $f\left(\frac{\partial i_c}{\partial t_1} i_c\right)$; $\varphi\left(\frac{\partial u_c}{\partial t_1} u_c\right)$ – функции, учитывающие соответственно влияние поверхностного эффекта в земле и проводах линии и влияние коронирования фазных проводов линии или системы шин. В системе (2) все переменные и коэффициенты являются матрицами n-го порядка в зависимости от числа взаимосвязанных фазных проводов.

Для учета поверхностного эффекта вместо функции $f\left(\frac{\partial i_c}{\partial t_1} i_c\right)$ можно использовать выражение, полученное в [5] на основе модели поверхностного эффекта и успешно применяемое при анализах высокочастотных дуговых перенапряжений. Учитывая, что расчет феррорезонансных перенапряжений требует не очень высокой частоты, с целью упрощения первого этапа анализа феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений можно использовать только вторую часть модели поверхностного эффекта [6].

Для учета коронирования проводов линии функции $\varphi\left(\frac{\partial u_c}{\partial t} u_c\right)$ используется модель короны [7], которая позволяет моделировать этот процесс в расширенном диапазоне частоты. Достоинство этой модели заключается в том, что, во-первых, она апробирована именно при исследованиях феррорезонансных явлений, во-вторых, при анализе высокочастотных перенапряжений увеличение числа параллельных ветвей никак не влияет на расчетную формулу и не нарушает последовательности алгоритма [8].

Полученные выражения для обеих функций в общем виде представляются в следующем виде:

$$u_s = f\left(\frac{\partial i_c}{\partial t_1} i_c\right) = Z_n i_d - Z_n \sum_{k=1}^{n} Z_k i_{fk} \; ; \qquad (3)$$

$$i_{\text{кор}} = \varphi\left(\frac{\partial u_c}{\partial t} u_c\right) = G\left[u_d\left(1 - \frac{u_3}{|u_d|}\right)\right] - G\left[u_f\left(1 - \frac{u_3}{|u_f|}\right)\right] - \sigma_k i_k (t - 2\tau) \, , \qquad (4)$$

где Z_n, Z_k, G, σ_k – коэффициенты, учитывающие поверхностный эффект и коронирование провода [9]; u_3 – напряжение зажигания короны.

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 ($x - h$, $t - \tau$); q ($x + h$, $t - \tau$) и позволяет вычислить напряжения u_d и токи i_d.

После определения напряжений и токов в точках *d* эти точки принимаются как точки *p* и *q*, затем вычисляются напряжения и токи в точках, соответствующих шагу времени 4τ. Так вычисления продолжаются до заданного значения времени.

С ростом числа точек на отрезках линии увеличивается число матричных умножений. При необходимости уменьшения накопления погрешности вычисления используется сглаживание данных численных экспериментов. В этом алгоритме были применены линейные сглаживания по трем и пяти точкам. При использовании линейного сглаживания вначале по известным значениям напряжений и токов в точках *p* и *q* вычисляются значения указанных величин в точках *d*. Затем полученные значения *u* и *i* [10] усредняются с помощью следующих формул:

$$
\begin{aligned}
&\bar{u}_{A,B,C}(h,0) = \left[5u_{A,B,C}(h,0) + 2u_{A,B,C}(3h,0) + u_{A,B,C}(5h,0)\right]/6;\\
&\bar{u}_{A,B,C}(2h,0) = \left[u_{A,B,C}(h,0) + u_{A,B,C}(3h,0) + u_{A,B,C}(5h,0)\right]/3;\\
&\bar{u}_{A,B,C}(nh,0) = \left[5u_{A,B,C}(nh,0) + 2u_{A,B,C}((n-1)h,0) + u_{A,B,C}((n-2)h,0)\right]/6;\\
&\bar{i}_{A,B,C}(h,0) = \left[5i_{A,B,C}(h,0) + 2i_{A,B,C}(3h,0) + i_{A,B,C}(5h,0)\right]/6;\\
&\bar{i}_{A,B,C}(3h,0) = \left[i_{A,B,C}(h,0) + i_{A,B,C}(3h,0) + i_{A,B,C}(5h,0)\right]/3;\\
&\bar{i}_{A,B,C}(nh,0) = \left[5i_{A,B,C}(nh,0) + 2i_{A,B,C}((n-1)h,0) + i_{A,B,C}((n-2)h,0)\right]/6,
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

где *A*, *B*, *C* – фазы линии.

Результаты такого сглаживания данных численного эксперимента при разных фиксированных моментах вычисления приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты линейного сглаживания по трем точкам (*n* = 10) при *t* = 0,48 · 10^{-1} с

№ п/п	Напряжение, о. е.						Токи, А					
	Фаза *A*		Фаза *B*		Фаза *C*		Фаза *A*		Фаза *B*		Фаза *C*	
	u_{A^-} исход.	$\bar{u}_{A^-}$ сглаж.	u_{B^-} исход.	$\bar{u}_{B^-}$ сглаж.	u_{C^-} исход.	$\bar{u}_{C^-}$ сглаж.	i_{A^-} исход.	$\bar{i}_{A^-}$ сглаж.	i_{B^-} исход.	$\bar{i}_{B^-}$ сглаж.	i_{C^-} исход.	$\bar{i}_{C^-}$ сглаж.
0	0,58718	0,58718	2,2321	2,2321	2,2321	2,2321	6,7280	6,7275	0	$-0{,}39299 \cdot 10^{-4}$	0	$-0{,}10095 \cdot 10^{-3}$
1	0,58856	0,58845	2,2327	2,2336	2,2327	2,2346	7,2181	7,2191	–0,58735	–0,58727	–0,58750	–0,58730
2	0,58990	0,58988	2,2331	2,2321	2,2331	2,2351	7,7113	7,7122	–1,1745	–1,1744	–1,1744	–1,1743
3	0,59119	0,59128	2,2334	2,2354	2,2334	2,2364	8,2073	8,2084	–1,7614	–1,7604	–1,7611	–1,7622
4	0,59244	0,59242	2,2337	2,2326	2,2337	2,2346	8,7064	8,7074	–2,3483	–2,3453	–2,3480	–2,3471
5	0,59363	0,59342	2,2338	2,2348	2,2338	2,2348	9,2085	9,2095	–2,9353	–2,9305	–2,9352	–2,9333
6	0,59478	0,59487	2,2338	2,2358	2,2338	2,2378	9,7134	9,7144	–3,5229	–3,5231	–3,5228	–3,5230
7	0,59589	0,59577	2,2337	2,2387	2,2337	2,2357	10,221	10,252	–4,1110	–4,1113	–4,1110	–4,1112
8	0,59694	0,59693	2,2335	2,2385	2,2335	2,2345	10,732	10,703	–4,7000	–4,7003	–4,7000	–4,7004
9	0,59795	0,59794	2,2332	2,2382	2,2332	2,2352	11,246	11,247	–5,2899	–5,2904	–5,2901	–5,2905
10	0,59892	0,59892	2,2328	2,2328	2,2328	2,2328	11,763	11,762	–5,8813	–5,8811	–5,8813	–5,8811

Сглаживание по трем точкам при расчетах феррорезонансного процесса полностью обеспечивает устойчивость расчета. Необходимость использования метода сглаживания по пяти точкам не возникает. Однако при расче-

тах кумулятивного перенапряжения рассмотрена целесообразность использования метода сглаживания по пяти точкам. Результаты вычисления показали улучшение сходимости расчетов, но незначительное. Поэтому при расчетах кумулятивного перенапряжения были поставлены задачи использования метода нелинейного сглаживания по семи точкам. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования нелинейного сглаживания. При разбиении расчетной сетки на очень маленькие участки нелинейное сглаживание увеличивает время расчета. Вот почему при расчете кумулятивного перенапряжения необходимо рассмотрение более гибкого алгоритма расчета напряжений и токов во внутренних точках линии.

Таблица 2

Результаты линейного сглаживания по трем точкам (n = 10) при t = 0,6481 ± 10^{-1} с

№ п/п	Напряжение, о. е.						Токи, *A*					
	Фаза *A*		Фаза *B*		Фаза *C*		Фаза *A*		Фаза *B*		Фаза *C*	
	u_{A^-} исход.	$\bar{u}_{A^-}$ сглаж.	u_{B^-} исход.	$\bar{u}_{B^-}$ сглаж.	u_{C^-} исход.	$\bar{u}_{C^-}$ сглаж.	i_{A^-} исход.	$\bar{i}_{A^-}$ сглаж.	i_{B^-} исход.	$\bar{i}_{B^-}$ сглаж.	i_{C^-} исход.	$\bar{i}_{C^-}$ сглаж.
0	0,95062	0,95061	–1,2947	–1,2947	–1,2947	–1,2947	–2,9053	–2,9051	0	$0{,}52288 \cdot 10^{-4}$	0	$0{,}52286 \cdot 10^{-4}$
1	0,95020	0,95027	–1,2949	–1,2939	–1,2949	–1,2939	–2,8363	–2,8369	0,11459	0,11449	0,11467	0,11456
2	0,94980	0,94971	–1,2951	–1,2955	–1,2951	–1,2981	–2,7690	–2,7696	0,22887	0,22880	0,22902	0,22892
3	0,94942	0,94953	–1,2953	–1,2962	–1,2952	–1,2932	–2,7034	–2,7040	0,34295	0,34291	0,34307	0,34306
4	0,94905	0,94906	–1,2954	–1,2963	–1,2954	–1,2923	–2,6396	–2,6402	0,45691	0,45691	0,45708	0,45708
5	0,94870	0,94881	–1,2954	–1,2954	–1,2954	–1,2934	–2,5775	–2,5780	0,57088	0,57092	0,57110	0,57114
6	0,94837	0,94857	–1,2955	–1,2975	–1,2955	–1,2924	–2,5170	–2,5176	0,68496	0,68507	0,68525	0,68535
7	0,94804	0,94805	–1,2955	–1,2934	–1,2955	–1,2974	–2,4582	–2,4588	0,79936	0,79953	0,79970	0,79981
8	0,94774	0,94784	–1,2954	–1,29,64	–1,2954	–1,2954	–2,4011	–2,4017	0,91425	0,91444	0,91449	0,91471
9	0,94745	0,94705	–1,2953	–1,2950	–1,2953	–1,2983	–2,3457	–2,3462	1,0297	1,0299	1,0299	1,0301
10	0,94717	0,94717	–1,2952	–1,2952	–1,2952	–1,2952	–2,2918	–2,2915	1,1459	1,1458	1,1459	1,1458

Система (2) позволяет полностью сохранить основные достоинства метода математического моделирования волновых процессов в сложных электрических сетях, высокую точность и экономичность расчетов и при компьютерном моделировании феррорезонансных перенапряжений, кумулятивных высокочастотных перенапряжений и защиты от них.

В итоге из-за универсальности системы (2) для рассматриваемых или всех волновых процессов в сложных сетях она используется для моделирования волновых процессов на II узле расчетной схемы.

Для III узловой точки расчетной схемы можно записать:

$$\frac{di_{T_1}}{dt} = L_{T_1}^{-1}(u_2 - u_\mu);$$

$$\frac{di_{T_2}}{dt} = L_{T_2}^{-1}\left[u_\mu - r(t)i_{T_2}\right] \text{ при } L_{T_2}^{-1} = 0;\ \ i_{T_2} = 0\,; \qquad (6)$$

$$\frac{di_{c_2}}{dt} = C_T^{-1} i_{c_2}\,;$$

$$\frac{d\psi}{dt} = (u_\mu - r_\mu i_\mu),$$

где $i_{c2} = i_k - i_{T1}$; $i_{T1} = i_\mu - i_{T2}$; $i_\mu = f(\psi(t))$.

Кривая намагничивания ТН в данной работе аппроксимируется степенным полиномом [11]. Для моделирования вольт-амперной характеристики нелинейного резистора использована сплайн-интерполяция, обеспечивающая наилучшее приближение [12].

Сопротивление $r(t)$, вводимое в цепь при феррорезонансе или коммутации с помощью выключателя В в цикле АПВ, целесообразно представлять в следующем виде [4]:

$$r(t) = \frac{u_r}{i_r} = u_r i_r^{-1} \text{ или } r(t) = r_0 \left| i_r \right|^{\alpha - 1}, \quad (7)$$

где u_r – мгновенное значение напряжения на сопротивлении $r(t)$; r_0 – начальное значение при токе $i_2 = 1$ А, численно равное падению напряжения на сопротивлении $r(t)$.

В случае его неустойчивости при расчете происходит поэтапное сужение расчетной сетки с одновременной оценкой устойчивости и достигается длина шага, при которой обеспечивается устойчивость.

Результаты численного анализа подавления феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений слабонелинейным резистором. Для иллюстрации разработанного алгоритма приведен следующий пример. Выбрано РУ напряжением 330 кВ с ТН НКФ-330. Параметры РУ и число выключателей соответствуют реальным, отвечают справочным данным, длина l = 100…300 м. Выключатель В на расчетной схеме предусмотрен для АПВ шин РУ.

Значения сопротивления $r(t)$ с уменьшением тока менее 1 А повышаются до двойной величины и уменьшаются с увеличением тока. Поэтому для выбора начального значения сопротивления $r(t)$ можно использовать тот факт, что при подавлении феррорезонансного перенапряжения с помощью источника напряжения от собственных нужд РУ максимальное значение установившегося напряжения на шине РУ равно $0{,}5U_{\text{фм}}$, что соответствует расчетному значению u_2, которое равно [1]

$$u_2 = e_1(t)\frac{C_{\text{в}}}{C_{\text{в}} + C_{\text{ш}}}. \quad (8)$$

При максимальном фазном напряжении, равном $U_{\text{фм}}$, например, для $U_{\text{фм}}$ = = 300 кВ, при токе, равном 1 А, сопротивление $r_0 = 0{,}5U_{\text{фм1}} = 150000$ Ом, приведенное на стороне высокого напряжения ТН. Если r_0 привести на сторону низшего напряжения ТН, то оно получится приблизительно равным $r_0 = 0{,}2$ Ом, что соответствует выбранному значению балластной нагрузки в устройстве фиксации и подавления феррорезонанса, внедренном до серийного выпуска устройства, в котором для подавления используется размагничивающее напряжение от собственных нужд РУ.

На рис. 2 представлена расчетная осциллограмма развития феррорезонансного перенапряжения на шине РУ с ТН. Максимальные значения перенапряжений достигают $1{,}6U_{\text{фм}}$. Эта осциллограмма на всех феррорезо-

нансных процессах с ТН при компьютерном моделировании и управлении действием защиты принимается как тестовая кривая.

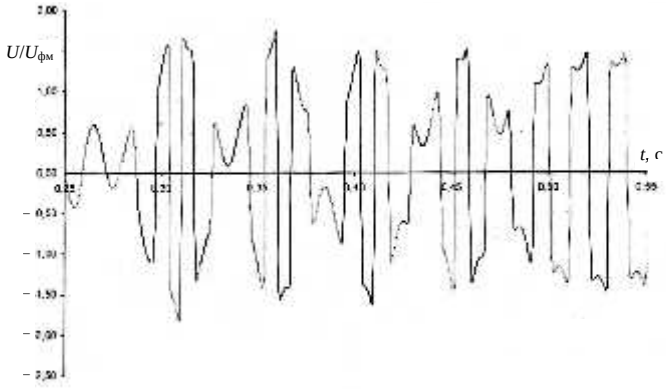

Рис. 2. Расчетная осциллограмма развития феррорезонансного процесса

Для исключения феррорезонансного перенапряжения рассмотрим подключение на низшую сторону ТН нелинейного сопротивления $r_0 \approx 0{,}2$ Ом с коэффициентом нелинейности $\alpha = 0{,}9$ на момент $t_{вк}$ = 0,314 с после развития феррорезонансного процесса. Полученные расчетные осциллограммы напряжения на входе ТН и тока через него представлены на рис. 3. На осциллограмме видно, что введение в цепь нелинейного резистора эффективно воздействует на процесс подавления феррорезонанса. Время протекания максимального тока составляет не более 0,004 с.

а б

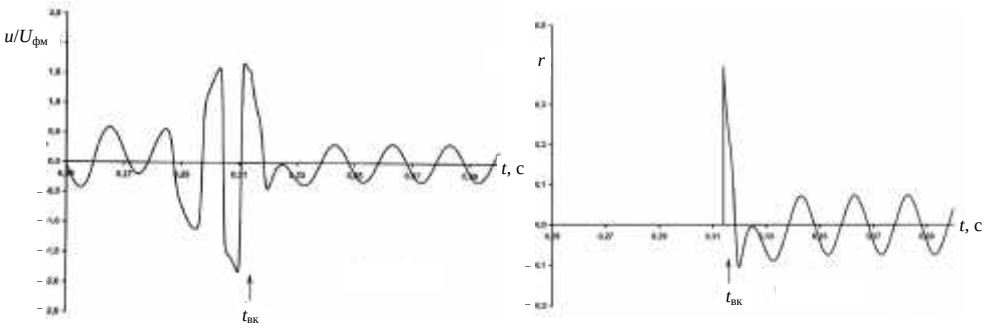

Рис. 3. Расчетные осциллограммы феррорезонансного перенапряжения тока при подавлении феррорезонансного процесса

После анализа подавления феррорезонансного процесса, выбранного как тестовая задача, были выполнены расчеты и для подавления кумулятивного коммутационного перенапряжения. При этом рассмотрены два варианта. В первом варианте рассмотрена коммутация системы шин РУ с ТН без нелинейного сопротивления. Полученная расчетная осциллограмма представлена на рис. 4.

При расчете принято, что в момент $t_{вк}$ = 0,353 с происходит включение системы шин РУ под напряжение. На рис. 4: кривая 1 – напряжение источника; кривая 2 – напряжение на входе ТН. После включения начинаются высокочастотные переходные процессы. Амплитуды перенапряжения достигают $2U_{фм}$. В момент $t_{от}$ = 0,358 с происходит погасание дуги между

контактами выключателя В. Восстанавливается исходный режим с колебательным процессом. При этом амплитуды перенапряжений – не более $1{,}5U_{\text{фм}}$. Если происходит повторное зажигание дуги между контактами в момент $t_{\text{вк}} = 0{,}373$ с, то величина амплитуды высокочастотного перенапряжения достигает $2{,}5U_{\text{фм}}$.

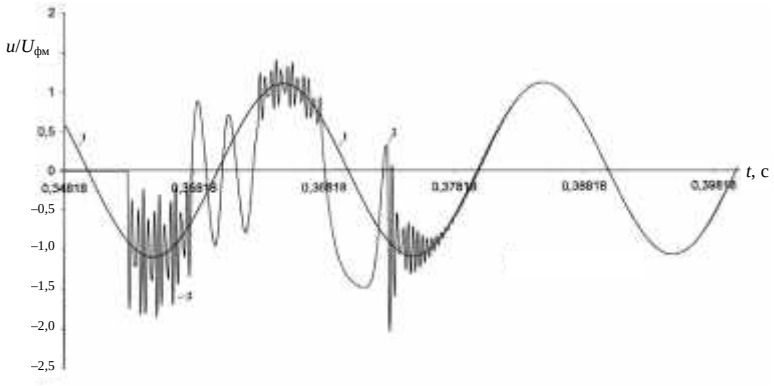

Рис. 4. Расчетные осциллограммы развития кумулятивного перенапряжения при АПВ системы шин

Для выполнения задачи, поставленной в данной работе, были произведены и расчеты подавления высокочастотного кумулятивного перенапряжения с помощью нелинейного сопротивления $r(t)$, вводимого на стороне низшего напряжения ТН. Параметры сопротивления соответствуют параметрам, выбранным при подавлении феррорезонансного перенапряжения. Выбор соответствующего сопротивления обусловлен совмещением защит от феррорезонансных перенапряжений и кумулятивных перенапряжений при АПВ шин РУ.

Расчетная осциллограмма изменения напряжения на входе ТН с одним повторным пробоем представлена на рис. 5, а кривая сопротивления $r(t)$ – на рис. 6. Моменты включения и отключения (погасания дуги между контактами выключателя) аналогичны моментам в процессах коммутации без $r(t)$. Как видно из расчетной осциллограммы, при повторном включении с $r(t)$ высокочастотная составляющая напряжения отсутствует.

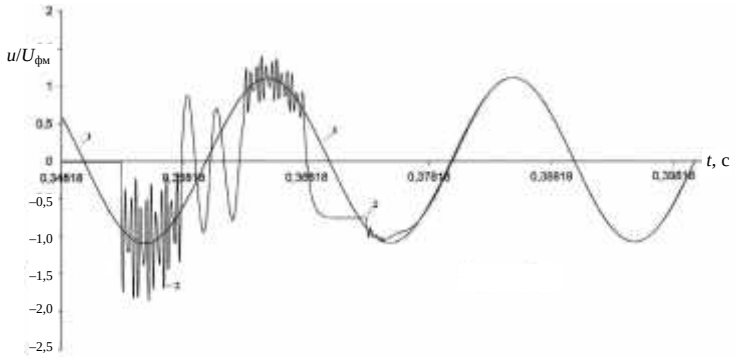

Рис. 5. Расчетные осциллограммы подавления кумулятивного перенапряжения при АПВ системы шин

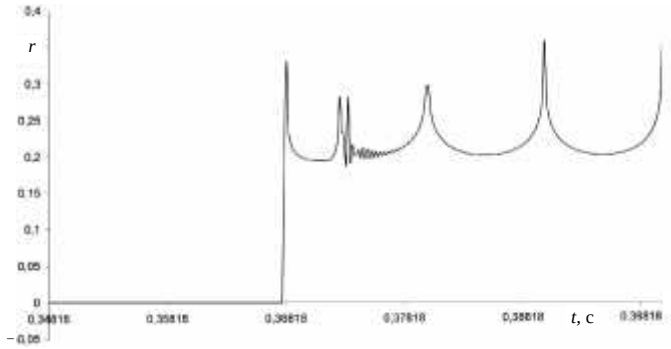

Рис. 6. Расчетное значение нелинейного сопротивления при АПВ системы шин

Известно, что мощность, выделяемая в нелинейном сопротивлении – резисторе, меньше мощности, выделяемой в линейном резисторе. Поэтому принятые для представленных результатов начальное значение сопротивления $r(t)$ и коэффициенты нелинейности нельзя считать оптимальными. Для получения технических характеристик защитного устройства с $r(t)$ при совмещении защиты от обоих перенапряжений выбранные начальные значения сопротивления и коэффициенты нелинейности α необходимо координировать с полученными результатами при защите от этих перенапряжений с подачей напряжения на ТН от собственных нужд РУ.

ВЫВОД

Из приведенных выше результатов видно, что для решения задачи защиты от обоих видов перенапряжений в отдельности или в единой расчетной схеме возможно введение в алгоритм блока корректировки момента подключения $r(t)$ к ТН.

С помощью слабонелинейного сопротивления можно решить проблему защиты оборудования РУ от высокочастотного перенапряжения путем совмещения ее с защитой от феррорезонансного перенапряжения в едином устройстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев Е. В., Гашимов А. М., Пивчик И. Р., Гасанова С. И. Подавление феррорезонанса в распределительных устройствах с трансформатором напряжения и уменьшение кумулятивных перенапряжений // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 4. – С. 9–18.

2. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения. – Киев, 1995. – С. 28.

3. Предотвращение 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. Р. Пивчик // Проблемы энергетики. – 2002. – № 1–2. – С. 61–69.

4. Дмитриев Е. В., Гашимов А. М., Ахмедов 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.

5. Гашимов А. М., Дмитриев Е. В., Пивчик И. Р. Численный анализ волновых процессов в электрических сетях. – Новосибирск: Наука, 2003. – 147 с.

6. Насер М. Табатабаеи, Ахмедов Х. М., Гашимов А. М. Расчетные формулы линии электропередачи с учетом комбинированной модели поверхностного эффекта при расчетах высокочастотных перенапряжений // First International Conference on Technical & Physical Problems in Power Engineering, Baku, 23–25 April 2002. – P. 197–200.

7. Александров Г. Н. Коронный разряд на линиях электропередачи. – М.; Л.: Энергия, 1964. – С. 228.

8. Расчеты электромагнитных процессов при неполнофазном включении линии электропередачи 110 кВ с ненагруженными трансформаторами / Ч. М. Джуварлы, С. А. Рустамов, А. М. Гашимов и др. // Электричество. – 2004. – № 8. – С. 16–22.

9. 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.

10. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 240 с.

11. Артемьев Д. Е., Тиходеев Н. Н., Шур С. С. Статические основы выбора изоляции линии электропередачи высших классов напряжения. – М.: Энергия, 1965. – 215 с.

12. Применение сплайн-интерполяции для моделирования вольт-амперной характеристики защитных аппаратов / Ч. М. Джуварлы, Е. В. Дмитриев, А. М. Гашимов и др. // ДАН-Баку: Элм, 1986. – Т. XLII. – № 5. – С. 24–27.

Поступила 30.05.2005

УДК 621.311.031

ПРИМЕНЕНИЕ ОПН ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ 6–10 кВ

Канд. техн. наук, доц. БОХАН А. Н., асп. КРОТЕНОК В. В.

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Величины перенапряжений в распределительных сетях 6–10 кВ зависят от многочисленных факторов: режима заземления нейтрали, эквивалентной емкости сети на землю, типа коммутационного аппарата, характера замыкания на землю и т. п. Повышение надежности распределительных сетей 6–10 кВ представляет собой комплексную задачу, решение которой зависит от состава и режимов работы энергоиспользующего оборудования, протяженности и состояния изоляции кабельных сетей, допустимых перерывов в электроснабжении и др. Решение позволяет оптимизировать выбор средств ограничения перенапряжений в сети и определить основные требования к устройствам релейной защиты и автоматики.