

УДК 621.311

ПОДАВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ И КУМУЛЯТИВНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫМИ РЕЗИСТОРАМИ

ГАСАНОВА С.И., ГАШИМОВ А.М., ДМИТРИЕВ Е.В., ПИВЧИК И.Р.

Институт Физики НАН Азербайджана

В настоящее время во многих энергосистемах стран СНГ, а также в странах, осуществляющих модернизацию своих энергосистем, идет плановое переоснащение систем защиты оборудования распределительных устройств (РУ) от перенапряжений, устаревшие коммутационные аппараты заменяются новыми, в основном элегазовыми, что значительно повышает надежность развивающихся энергосистем.

Вместе с тем массовая замена защитного оборудования и внедрение новых защитного оборудования с расширенными возможностями практически невозможны в связи с высокой стоимостью этого оборудования, отсутствием разработанных новых устройств, и, наконец, технической нецелесообразностью использовать различные защитные средства для каждого вида перенапряжений. Кроме того, очевидно, что механическую замену старого оборудования на новое нельзя считать прогрессивным шагом, так как при этом недоиспользуются возможности каждого из средств устанавливаемой защиты.

В связи с этим возникает необходимость совмещения защиты нескольких видов перенапряжений в едином комплексе, в том числе защиты от феррорезонансных перенапряжений, развивающихся в сети при отключении системы шин РУ с трансформатором напряжения (ТН), и высокочастотных кумулятивных перенапряжений, возникающих при восстановлении нормальной работы системы шин после ее отключения.

Совмещение защиты от феррорезонансных и кумулятивных коммутационных перенапряжений требует комплексного подхода как в области исследования, так и в области разработки устройств защиты с использованием современной вычислительной техники. При расширении научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по созданию новых эффективных защитных средств от внутренних перенапряжений необходимо дальнейшее развитие и компьютерного моделирования. Большое значение в этом направлении имеет совершенствование и разработка метода и алгоритма анализа сложных электрических цепей, содержащих нелинейные элементы, как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами.

Феррорезонансные перенапряжения на оборудовании РУ возникают в результате отключения воздушными, маломасляными и элегазовыми выключателями, укомплектованными емкостными делителями напряжения, системы шин с трансформатором напряжения, при котором образуется контур из емкости емкостных делителей выключателей и включенной последовательно с ней нелинейной индуктивности ТН, рис.1а. При образовании такой последовательности соединений феррорезонансные явления происходят вследствие насыщения стали ТН.

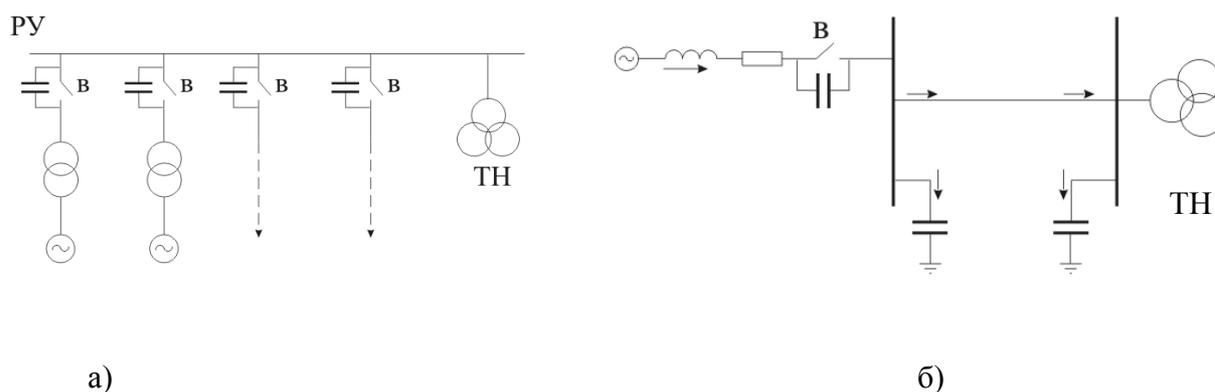


Рис.1. Электрические схемы феррорезонансного процесса (а) и коммутационного контура (б) при АПВ системы шин

Для защиты от феррорезонансных перенапряжений разработаны и применены различные способы и средства, исключающие эти перенапряжения. Из них более эффективными являются использование балластного резистора и подключение постороннего источника напряжения к ТН для размагничивания его сердечника [1].

Высокочастотные кумулятивные перенапряжения возникают при коммутации выключателями малых емкостных токов, в том числе осуществление автоматического повторного включения (АПВ) шин (рис.1б) с многократными пробоями межконтактного промежутка в процессе схождения контактов выключателя [2].

Для уменьшения высокочастотных коммутационных перенапряжений предложены различные способы и средства: 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 сталкивается с непреодолимыми барьерами. Поэтому возникли предложения о совмещении способа защиты от феррорезонансных перенапряжений и перенапряжений при включении системы шин РУ в едином устройстве.

Осуществление этого совмещения представляется возможным, 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, представляющая возможные случаи феррорезонансных перенапряжений и кумулятивных перенапряжений при АПВ холостых шин в РУ с ТН, приведена на рис.2. На схеме представлены: источники питания $e_1(t) = e_2(t) = U_{\text{фм}} \sin \omega t$, C_B и C_1 - емкости емкостных делителей выключателей, емкости системы шин и оборудования на землю $C_{\text{ш}}$ и C_T , индуктивности и сопротивление ТН L_{T1} , L_{T2} и r_{μ} , 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_n , i_k , i_{T1} , i_{T2} , i_{μ} и i_r , протекающие в соответственных ветвях схемы с положительно принятыми направлениями, нелинейное сопротивление $r(t)$, подключенное на низкой стороне ТН.

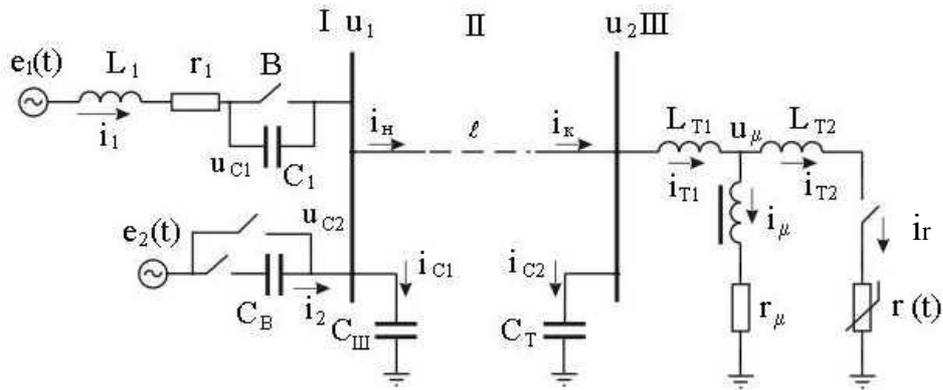


Рис.2. Расчетная схема для компьютерного моделирования феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений

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 $L_1^{-1} \neq 0$, $C_B^{-1} = 0$.
- определяются напряжения и токи в промежуточных точках линии ℓ - II узел. При вычислении исходный расчетный шаг выбирается из условия $h = v \cdot \tau$, здесь v – скорость распространения электромагнитной волны в линии без потерь, h, τ – постоянные по осям времени и расстояния;
- определяются напряжения, токи, поток намагничивания ТН и мгновенное значение нелинейного сопротивления $r(t)$ – III узел. При вычислении напряжения, тока и потока намагничивания ТН без $r(t)$ принимается, что индуктивность $L_{T2}^{-1} = 0$.
- 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 мгновенного значения сопротивления $r(t)$.

Для узловой точки I можно записать:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_1}{dt} &= L_1^{-1} [e_1(t) - r_1 i_1 - u_{c1} - u_1]; \\
 \frac{du_{c1}}{dt} &= C_1^{-1} \cdot i_1; \text{ при } C_1^{-1} \neq 0; i_1 \neq 0; \\
 \frac{du_{c2}}{dt} &= C_B^{-1} \cdot i_2; \text{ при } C_B = 0; i_2 = 0; \\
 \frac{du_1}{dt} &= C_u^{-1} \cdot i_{c1},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}
 e_1(t) &= u_{c2} + u_1; \\
 i_H + i_{c1} &= i_1 + i_2.
 \end{aligned}$$

здесь i_n - ток в начале линии, определяется с учетом уравнения линии электропередачи.

С учетом поверхностного эффекта и короны при численных расчетах волновых процессов, уравнения линии электропередачи описываются разностными выражениями [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 $z = (L_0 C_0^{-1})^{0.5} \cdot \ell$ – 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 $x = 0, x = \ell, t = 0$ 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 $p(x - h, t - \tau), q(x + h, t - \tau)$ и позволяет вычислить напряжение u_d и ток i_d .

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 система (2) для рассматриваемых, или, в общем виде, для всех волновых процессов в сложных сетях, она используется для моделирования волновых процессов во II узле расчетной схемы.

Для III узловой точки расчетной схемы можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{di_{T1}}{dt} &= L_{T1}^{-1}(u_2 - u_\mu); \\ \frac{di_{T2}}{dt} &= L_{T2}^{-1}[u_\mu - r(t) \cdot i_{T2}], \quad \text{при } L_{T2}^{-1} = 0; \quad i_{T2} = 0; \\ \frac{di_{c2}}{dt} &= C_T^{-1} \cdot i_{c2}; \\ \frac{d\psi}{dt} &= (u_\mu - r_\mu \cdot i_\mu), \end{aligned} \quad (3)$$

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

Кривая намагничивания ТН в данной работе аппроксимируется степенным полиномом [6]. Для моделирования вольтамперной характеристики нелинейного резистора использована сплайн-интерполяция, обеспечивающая наилучшее приближение [5].

Мгновенное значение сопротивления $r(t)$, вводимого в цепь при феррорезонансе или при коммутации с помощью выключателя В в цикле АПВ, целесообразно представлять в следующем виде:

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

где u_r - мгновенное значение напряжения на сопротивлении $r(t)$; r_0 – начальное значение сопротивления, которое при токе $i_2 = 1A$ равно падению напряжения на сопротивлении $r(t)$.

К решению системы (1) и (3) с системами (2) целесообразно применить метод решения, предложенный [7], с использованием метода «Предиктор-корректор» и метода Вегстейна [8], обеспечивающие сходимости итерационного процесса при вычислении мгновенного значения сопротивления $r(t)$.

В соответствии с изложенным алгоритмом, была составлена ФОРТРАН – программа для современного компьютера.

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

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 $\ell = 100-300$ м. Выключатель В на расчетной схеме предусмотрен для АПВ шин РУ.

Мгновенные значения сопротивления с уменьшением тока менее 1А 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 [9] максимальное значение установившегося напряжения на шине РУ равно $0,5 U_{фм}$, что соответствует расчетному значению u_2 , которое равно

$$u_2 = e_1(t) \frac{C_B}{C_B + C_{ин}}$$

При максимальном фазном напряжении, равном $U_{фм}$, например, для $U_{фм} = 300кВ$, при токе, равном 1А, сопротивление $r_0 = 0,5U_{фм1} = 150000$ Ом, приведенное на стороне высокого напряжения ТН. Если r_0 привести на сторону низшего напряжения ТН, то оно приблизительно получится 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 [10].

На рис.3 представлена расчетная осциллограмма развития феррорезонансного перенапряжения на шине РУ с ТН. Максимальные значения перенапряжений достигают $1,6U_{фм}$. Эта осциллограмма на всех феррорезонансных процессах с ТН при компьютерном моделировании и управлении действием защиты принимается как тестовая кривая.

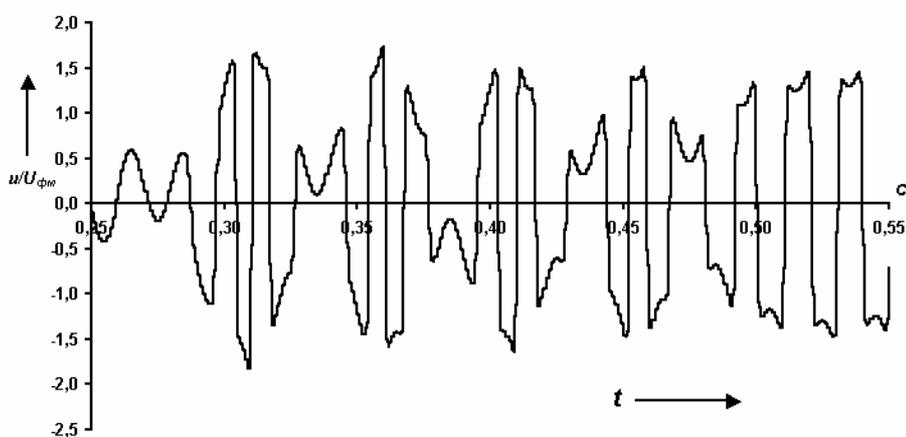


Рис.3. Расчетная осциллограмма развития феррорезонансного процесса.

Для исключения феррорезонансного перенапряжения рассмотрим подключение на низшую сторону ТН нелинейного сопротивления $r_0 \approx 0,2 \text{ Ом}$ с коэффициентом нелинейности $\alpha = 0,9$, на момент $t_{\text{вк}} = 0,314$ секунд после развития феррорезонансного процесса. Полученные расчетные осциллограммы напряжения на входе ТН и тока через него представлены на рис.4. Из осциллограммы видно, что введение в цепь нелинейного резистора эффективно воздействует на процесс подавления феррорезонанса. Время протекания максимального тока не более $0,004 \text{ с}$.

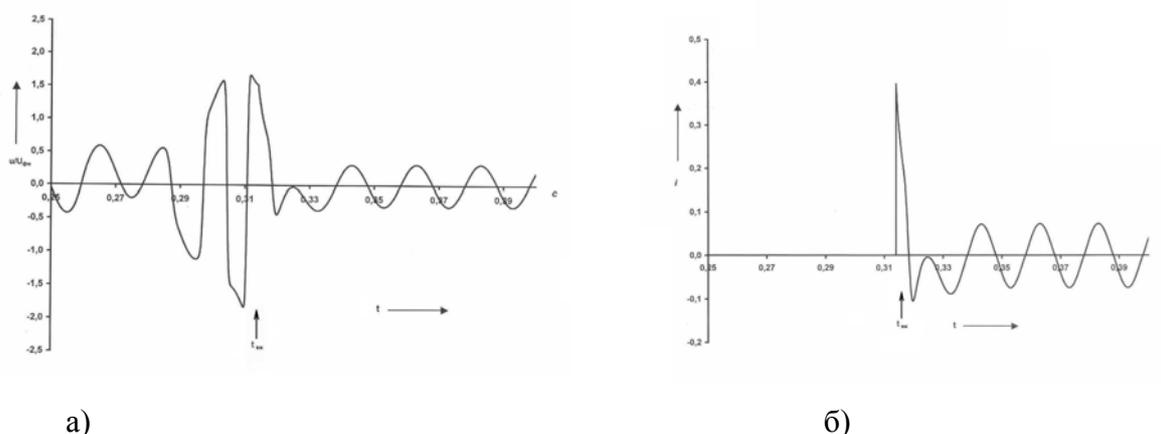


Рис.4. Расчетные осциллограммы феррорезонансного перенапряжения и тока при подавлении феррорезонансного процесса

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.5. При расчете принято, что в момент $t_{\text{вк}} = 0,353 \text{ с}$ происходит включение системы шин РУ под напряжение. На рис.5: кривая 1 – напряжение источника, кривая 2 – напряжение на входе ТН. После включения начинаются высокочастотные переходные процессы.

Амплитуды перенапряжения достигают $2U_{\phi м}$. В момент $t_{от} = 0,358с$ происходит погасание дуги между контактами выключателя В. Восстанавливается исходный режим с колебательным процессом. При этом амплитуды перенапряжений не более $1,5U_{\phi м}$. Если происходит повторное зажигание дуги между контактами в момент $t_{вк} = 0,373с$, то величина амплитуды высокочастотного перенапряжения достигает $2,5U_{\phi м}$.

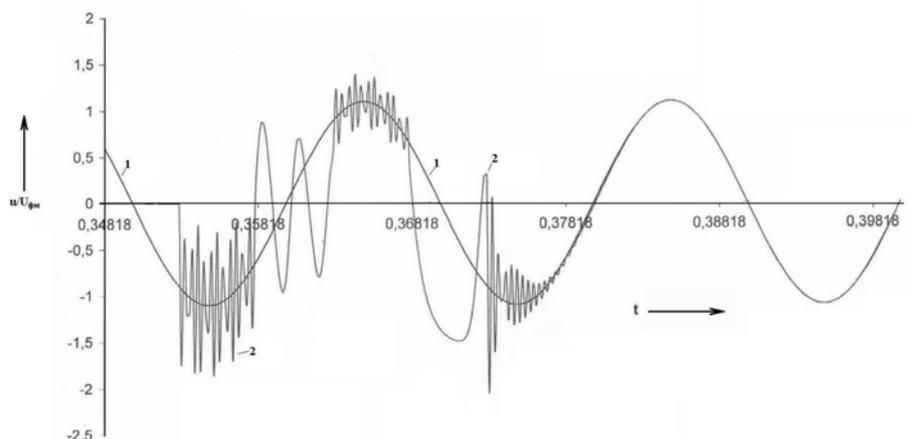


Рис.5. Расчетные осциллограммы развития кумулятивного перенапряжения при АПВ системы шин

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

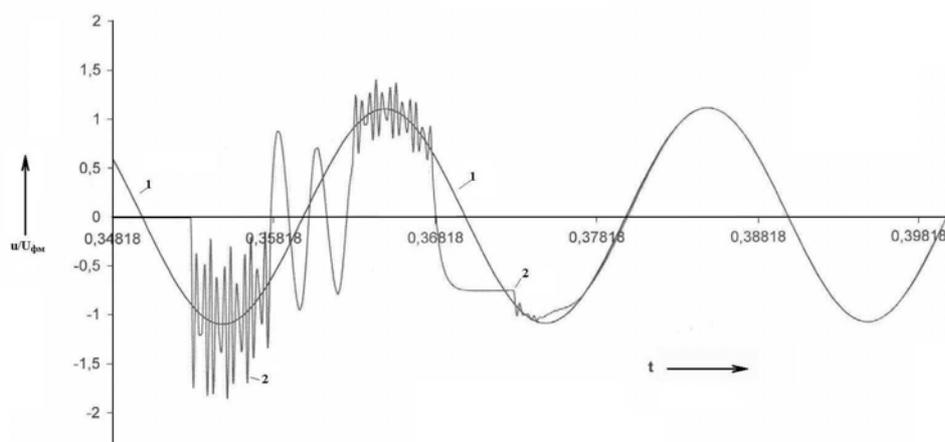


Рис 6. Расчетные осциллограммы подавления кумулятивного перенапряжения при АПВ системы шин

Расчетная осциллограмма изменения напряжения на входе ТН с одним повторным пробоем представлена на рис.6, а на рис.7 дана кривая сопротивления $r(t)$. 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.

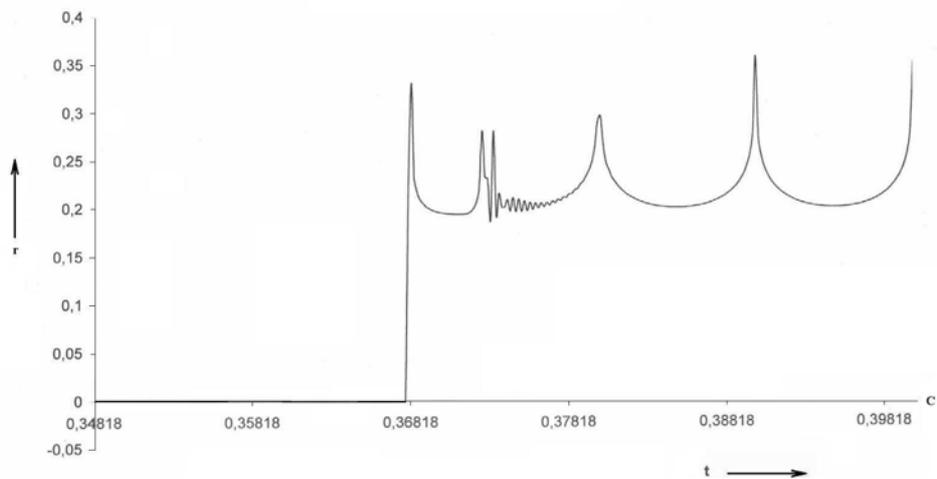


Рис 7 Расчетное значение нелинейного сопротивления при АПВ системы шин

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

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.

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.

Вывод

Предложен алгоритм защиты РУ от феррорезонансного перенапряжения и кумулятивного высокочастотного перенапряжения при АПВ шин с ТН с помощью слабонелинейных резисторов и показана возможность совмещения защит от обоих видов перенапряжений в едином устройстве, если это совмещение построено на базе разработанной компьютерной модели этих процессов.

1. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения/ Антипов К.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. и др. Киев: УНПО «Энергопрогресс», 1995, с. 34.

2. Кузнецов В.Г., Шидловский А.К., Дмитриев Е.В., Гасанова С.И., Гашимов А.М. Перенапряжения при коммутациях малых емкостных токов высоковольтными выключателями// Труды Института Электродинамики НАН Украины - 2002, - №1(1), - с. 95 – 99.

3. Ахмедов Х.М., Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Кузнецов В.Г., Максимов М.В., Шидловский А.М. Вопросы защиты оборудования распределительных устройств от высокочастотных коммутационных перенапряжений// Сборник статей по электрофизике и электроэнергетике. Баку, Элм, 1997. – с. 212 – 218.

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. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М. Задачи математического моделирования в проблеме повышения надежности электрических сетей высокого напряжения. Баку, Элм, 2000. – с.128 – 133.

6. Артенев Д.Е., Тиходоев., Шур С.С. Статистические основы выбора изоляции линий электропередачи высших классов напряжения, М-Л.: Энергия, 1965, - с. 376.

7. Волков Е.А. Численные методы. - М.: Наука, 1987, - с.238.

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

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

10. Максимов В.М. Исследование повреждаемости электромагнитных трансформаторов напряжения, разработка способов и технических средств их защиты в распрестройствах// Автореферат дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. Новосибирск, 1997, с. 20

PAYLAYICI QURĞULARDA FERROREZONANS VƏ KUMULYATİV İFRAT GƏRGİNLİKLƏRİN ZƏİF QEYRİ-XƏTTİ REZİSTORLARLA SÖNDÜRÜLMƏSİ

HƏSƏNOVA S.İ., HƏŞİMOV A.M., DMİTRİYEV Y.V., PİVÇİK İ.R.

Yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələri avadanlıqlarının izolyasiyası üçün təhlükəli olan ifrat gərginliyin yaranması ilə nəticələnən proseslərin kompyuter modelləri işlənilib hazırlanmışdır. Kompyuter modelləşdirilməsində ferrezonans və kumulyativ ifrat gərginliklərindən mühafizə tədbirlərinin seçilməsinin metod və alqoritminə baxılmışdır.

SUPPRESSION OF FERRESONANCE AND CUMULATIVE OVERVOLTAGES IN SWITCHING CENTRES BY WEAK-NONLINEAR RESISTORS

GASANOVA S.I., GASHIMOV A.M., DMITRIYEV Y.V., PIVCHIK I.R.

The article is devoted to development of computer models of the processes resulting to occurrence of overvoltages dangerous to insulation of an electric equipment of high voltage electric networks. The method and algorithm for a choice of actions on protection from ferrisonance and cumulative overvoltages at computer modeling are considered