

электрической энергии при периодической очистке нефтепровода, основанный на построении трендов эквивалентного диаметра нефтепровода на временных интервалах очистки нефтепровода и временных интервалах между очистками.

2. На основе разработанного способа произведена оценка годовой экономии электрической энергии при периодической очистке нефтепровода одного из участков нефтепровода, эксплуатируемого РУП «Гомельтранс-нефть “Дружба”». Годовая экономия электрической энергии составила 5210740 кВт·ч, или 1,64 % суммарного годового электропотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по очистке магистральных нефтепроводов. – Гомель: РУП «Гомельтранснефть “Дружба”», 2005. – 14 с.
2. Технологический расчет нефтепроводов / Э. М. Блейхер [и др.]. – М.: Московский институт нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, 1981. – 368 с.
3. Руководство по организации эксплуатации и технологии технического обслуживания и ремонта оборудования и сооружений нефтеперекачивающих станций: РД 39-30-1209-84. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1985. – 278 с.
4. Методика оценки экономии электрической энергии при проведении энергосберегающих мероприятий в технологическом процессе транспортировки нефти. – Минск: Концерн «Белнефтехим», 2005. – 57 с.
5. Рекомендации по подсчету экономии электроэнергии в нефтепроводном транспорте при внедрении организационно-технических мероприятий. – Бугульма: НИС УСЗМН, 1985. – 30 с.
6. Токочакова, Н. В. Оценка энергетической эффективности очистки нефтепроводов / Н. В. Токочакова, В. В. Воробьев, А. С. Фиков // Энергоэффективность. – 2005. – № 5. – С. 21–22.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 5.05.2006

УДК 621.311

ИСКУССТВЕННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

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

Институт физики НАН Азербайджана

Феррорезонансные перенапряжения, способствующие повреждению изоляции высоковольтного оборудования и кумулятивным возрастаниям дефектов, имеющих в изоляции, возникают при взаимодействии емкости конденсаторов, шунтирующих контакты выключателей, в том числе элегазовых, и нелинейной индуктивности намагничивания электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН).

При исследовании феррорезонансных перенапряжений, проходящих по схеме «суммарная емкость C_B делителей напряжения выключателя – нелинейная индуктивность ТН, шунтированная емкостью $C_{ш}$ оборудования распределительного устройства (РУ) относительно земли», для правильного описания физики явлений необходим анализ переходных процессов в выбранных схемах. На основе точного анализа разработаны и внедрены мероприятия по защите от феррорезонансных перенапряжений [1, 2].

Опубликовано много теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям нестационарных феррорезонансных перенапряжений, результаты которых обобщены в методических и руководящих указаниях по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения, содержащими емкостные делители напряжения [3, 4].

Всестороннее изучение феррорезонансных перенапряжений в РУ с ТН и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения, вызвало интерес к применению метода подавления феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений для получения повышенного напряжения, которое можно использовать для испытания изоляции электрооборудования РУ на прочность этих изоляций по отношению к внутренним перенапряжениям.

Вопрос об использовании искусственного возбуждения феррорезонанса для испытания ТН и другого электротехнического оборудования повышенным напряжением в эксплуатационных условиях рассматривался в [5]. Интерес к задаче получения повышенного напряжения феррорезонансного и кумулятивного типов обусловлен возможностью регулирования процесса возбуждения перенапряжений при применении устройства защиты от этих явлений. Так, в реальной сети выполнен эксперимент, подтверждающий теоретические предсказания влияния размагничивания ТН на феррорезонансные и кумулятивные перенапряжения.

В рамках назначения защитного устройства от феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений рассмотрена обратная задача: при отсутствии феррорезонансного перенапряжения получить его подачей на вторичную сторону ТН напряжения с постороннего источника, как это осуществляют при подавлении указанных явлений [6–8].

Рассмотрим расчетную схему (рис. 1), где для подавления феррорезонансного и кумулятивного перенапряжений на ТН от источника собственных нужд, находящегося вследствие феррорезонанса в противофазе с напряжением шин РУ, подключается источник напряжения $e_3(t) = e_1(t) \frac{C_B}{C_B + C_{ш}}$

в момент, как только начинают развиваться феррорезонансные процессы [1]. Феррорезонанс подавляется, и этот способ показал себя более эффективным и при ограничении кумулятивного перенапряжения. На схеме представлены: источники напряжения $e_3(t) = e_2(t) = U_{фм} \sin \omega t$; $e_3(t)$ – источник напряжения; C_{B1} , C_{B2} , $C_{ш}$, C_T – соответственно емкости емкостных делителей выключателей, емкости системы шин и оборудования на землю; L_{T1} , L_{T2} и r_{μ} – индуктивности и сопротивление ТН; l – длина шин до ТН в виде распределенного параметра; B_1 , B_2 – коммутирующие выключатели;

L_1, r_1 – параметры присоединения, участвующие в цикле АПВ; токи $i_1, i_2, i_n, i_k, i_{t_1}, i_{t_2}, i_{\mu}, i_{\omega}, i_c$ – токи, протекающие в соответственных ветвях схемы с положительно принятыми направлениями. Для расчета возбуждения феррорезонансного процесса воспользуемся общими выражениями, полученными для случая компьютерного моделирования феррорезонансных и коммутационных перенапряжений и защиты от них.

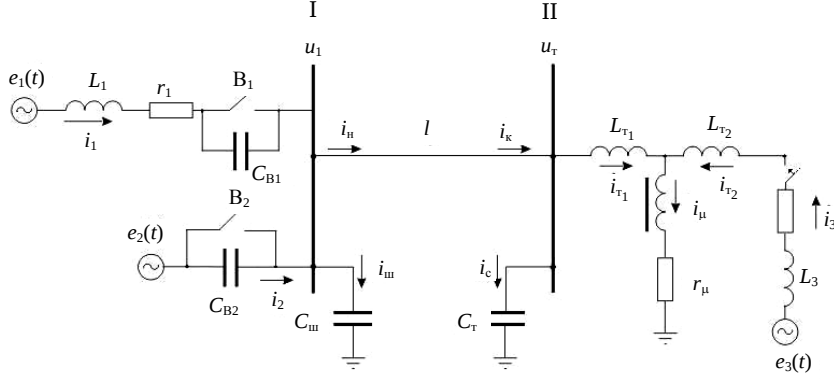


Рис. 1. Расчетная схема для компьютерного моделирования феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений

Для узловой точки I действительны следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= L_1^{-1} [e_1(t) - r_1 i_1 - u_1]; \\ \frac{du_1}{dt} &= (C_{B2} - C_{\omega})^{-1} (C_{B2} \omega U_{\text{фм}} \cos \omega t - i_1 + i_2 - i_{\omega}); \\ \frac{du_{c1}}{dt} &= C_{B1}^{-1} i_1 \text{ при } C_{B1}^{-1} \neq 0; i_1 \neq 0; \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= C_{B2}^{-1} i_2 \text{ при } C_{B2} = 0; i_2 = 0; \\ e_2(t) &= u_{c2} + u_1; \\ e_2(t) + u_{c2} &= u_1; \\ i_n + i_{\omega} &= i_1 + i_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Ток i_n в начале линии l определяется по выражению, полученному из расчетных разностных уравнений линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта в проводах и земле, а также коронирования проводов [9]:

$$i_n = (Z + Z_n)^{-1} (v_q - u_1), \quad (2)$$

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

$$v_q = -u_q(h, t - \tau) + zi_p(h, t - \tau) + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k \dot{\gamma}_k(t - 2\tau). \quad (3)$$

Система уравнений (1) с логическими элементами управления зажиганием дуги между контактами выключателя B_1 (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:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\tau 1}}{dt} &= L_{\tau 1}^{-1}(u_{\tau} - u_{\mu}); \\ \frac{di_{\tau 2}}{dt} &= L_{\tau 2}^{-1}(u_{\mu} - u_2); \\ \frac{di_3}{dt} &= L_3^{-1}[i_3(t) - i_3 i_3 - u_2]; \\ \frac{d\psi}{dt} &= u_{\mu} - r_{\mu} i_{\mu}; \\ \frac{du_{\tau}}{dt} &= C_{\tau}^{-1} i_C; \\ i_{\mu} &= f(\psi), \end{aligned} \quad (4)$$

где ψ – поток намагничивания трансформатора напряжения.

Нелинейные характеристики намагничивания трансформатора напряжения моделируются полиномом или сплайн-интерполяционным полиномом третьей степени.

Ток i_k в конце линии l определяется по выражению

$$i_k = (Z + Z_n)^{-1}(v_p + u_{\tau}), \quad (5)$$

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

$$v_p = u_p(l - h, t - \tau) + zi_p(l - h, t - \tau) + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k \dot{\gamma}_k(l, t - 2\tau). \quad (6)$$

В большинстве ранее выполненных расчетов переходных процессов применялся разностный метод второго порядка с уточнением значения приближенного решения. Однако в последнее время значительно повысился интерес к исследованию возможности применения быстрых алгоритмов, таких как при использовании высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем [10].

При создании многопроцессорной вычислительной системы использована так называемая разностная схема Кранка – Николсона [11]. Перспективы этого метода были видны еще при применении разностного метода второго порядка для расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей [12].

Для построения алгоритма расчета напряжений и токов в узловых точках с применением расчетной схемы Кранка – Николсона запишем системы уравнений (1)–(4) с учетом (2) и (3) в следующем матричном виде:

$$\frac{dy}{dt} + Ay = f, y = y \text{ при } t = 0. \quad (7)$$

В соответствии со схемой Кранка – Николсона можно записать:

$$\frac{y(t+2\tau) - y(t)}{2\tau} + Ay(t) = \gamma(t) \quad (8)$$

или

$$\frac{y(t+2\tau) - y(t)}{2\tau} + Ay(t+2\tau) = \gamma(t), \quad (9)$$

где 2τ – шаг расчета.

Из уравнений (8) и (9) имеем:

$$y(t+2\tau) = Ty(t) + 2\tau S\gamma(t); \quad (10)$$

$$T = E - 2\tau A \quad S = E \text{ – для (8);}$$

$$T = (E + 2\tau A)^{-1}; \quad S = T \text{ – для (10),}$$

где T – оператор шага; S – оператор источника; E – единичная матрица.

При численном эксперименте, несмотря на сужение расчетной сетки, в узловой точке разбиение сетки остается равномерным. Поэтому исходные дифференциальные уравнения в промежуточных точках можно записать в виде

$$\frac{y(t+2\tau) - y(t)}{2\tau} + A \frac{y(t+2\tau) + y(t)}{2} = \gamma(t), \quad (11)$$

тогда

$$T = (E + \tau A)^{-1}(E - \tau A); \quad S = (E + \tau A)^{-1}.$$

Для осуществления численного эксперимента можно использовать переменный шаг, который возможно уменьшить в ходе расчета.

Напряжения и токи в промежуточных точках линии между узловыми точками I и II определяются уравнениями линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и коронирования [8]:

$$\begin{aligned} (1 + G\gamma)u_d + (z + z_n)i_d &= u_p + zi_p + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk}; \\ -(1 + G\gamma)u_d + (z + z_n)i_d &= -u_q + zi_q - \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n \chi_k i_{fk}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для повышения устойчивости алгоритма надо уменьшить шаг расчета и увеличить число точек в интервале $x = 0$ и $x = l$ (рис. 2). В данном примере расчетная сетка разделена на три участка.

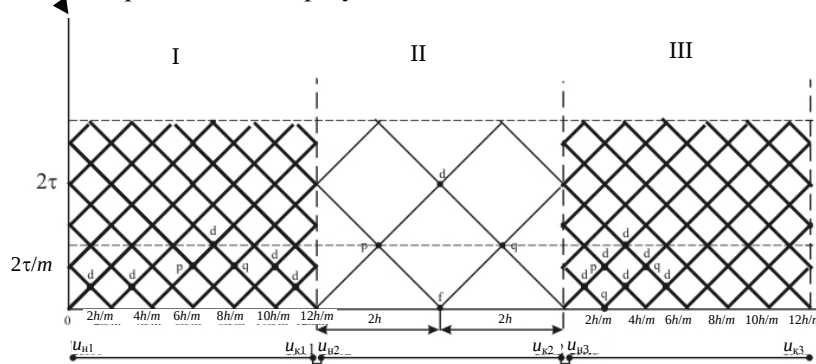


Рис. 2. Расчетная сетка

Алгоритм расчета напряжений и токов во внутренних точках линии построен следующим образом:

- вычисляются напряжения и токи в точках d расчетной сетки в зависимости от значений напряжений и токов в известных точках p , q и f ;
- на следующем шаге по времени точки d считаются как точки p и q , осуществляются вычисления напряжений и токов в новых точках d расчетной сетки;
- значения напряжений и токов точки f приравниваются к значениям напряжений и токов в точке d , сдвинутой по времени $t + 2\tau$;
- вычисления осуществляются по одной программе для точек в основном (точки d) и вспомогательном (точки p , q) слоях, начиная от начала линии ($x = 0$) к стороне конца линии ($x = l$).

С учетом изложенного алгоритма напряжения и токи по длине линии записываются без пропусков в точках расчетной сетки, равностоящих на величину $2h$, следующим образом:

в точках:

$$\begin{aligned} (0, 0) &\rightarrow u_{A, B, C}(0, 0), \quad I_{A, B, C}(0, 0); \\ (2h, 0) &\rightarrow u_{A, B, C}(2h, 0), \quad I_{A, B, C}(2h, 0); \\ (4h, 0) &\rightarrow u_{A, B, C}(2h, 0), \quad I_{A, B, C}(4h, 0); \\ &\dots\dots\dots \\ (nh, 0) &\rightarrow u_{A, B, C}(nh, 0), \quad I_{A, B, C}(nh, 0), \end{aligned}$$

где индексы A, B, C определяют фазы линии.

Напряжения и токи в точках d рассчитываются при известных значениях $u_{A,B,C}(0,0)$, $I_{A,B,C}(0,0)$ – $u_{A,B,C}(nh,0)$, $I_{A,B,C}(nh,0)$ следующим образом:

- для точки $(h, 2\tau)$:

$$\begin{aligned} u_{A,B,C}(h, 2\tau) &= (1 + \gamma h)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} - v_{q_{A,B,C}}); \\ i_{A,B,C}(h, 2\tau) &= (z + z_n)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} + v_{q_{A,B,C}}), \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} v_{p_{A,B,C}} &= u_{A,B,C}(0,0) + zi_{A,B,C}(0,0) + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(h,0); \\ v_{q_{A,B,C}} &= -u_{A,B,C}(2h,0) + zi_{A,B,C}(2h,0) - \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(h,0); \end{aligned}$$

- для точки $(3h, 2\tau)$:

$$\begin{aligned} u_{A,B,C}(3h, 2\tau) &= (1 + \gamma h)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} - v_{q_{A,B,C}}); \\ i_{A,B,C}(3h, 2\tau) &= (z + z_n)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} + v_{q_{A,B,C}}), \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} v_{p_{A,B,C}} &= u_{A,B,C}(2h,0) + zi_{A,B,C}(2h,0) + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(3h,0); \\ v_{q_{A,B,C}} &= -u_{A,B,C}(4h,0) + zi_{A,B,C}(4h,0) - \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(3h,0); \end{aligned}$$

- для точки $(nh, 2\tau)$:

$$\begin{aligned} u_{A,B,C}(nh, 2\tau) &= (1 + \gamma h)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} - v_{q_{A,B,C}}); \\ i_{A,B,C}(nh, 2\tau) &= (z + z_n)^{-1} (v_{p_{A,B,C}} + v_{q_{A,B,C}}), \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} v_{p_{A,B,C}} &= u_{A,B,C}((n-1)h,0) + zi_{A,B,C}((n-1)h,0) + \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(nh,0); \\ v_{q_{A,B,C}} &= -u_{A,B,C}((n+1)h,0) + zi_{A,B,C}((n+1)h,0) - \theta\gamma + z_n \sum_{k=1}^n x_k i(nh,0). \end{aligned}$$

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 . Вычисления продолжаются до заданного значения времени.

Как видно из расчетных формул, при вычислении осуществляется умножение матрицы на вектор. Для выполнения этого процесса при компьютерном моделировании применяется алгоритм, основанный на параллельных суммированиях [13].

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

Использование изложенного алгоритма решения граничных уравнений с уравнениями линии электропередачи при исследованиях феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений базируется на изложенном выше алгоритме.

В расчете были выбраны параметры C_{B_1} и C_{B_2} – суммарная емкость таким образом, чтобы на системе шин РУ получилось установившееся напряжение с амплитудой $\approx 0,6U_{\text{фм}}$, т. е. при отсутствии феррорезонанса (рис. 3). В момент $t_{\text{вк}} = 0,3$ с от начала расчета было осуществлено включение источника $e_3(t)$, где

$$e_3(t) = 2U_{\text{фм}} \frac{C_B}{C_B + C_{\text{ш}}} \sin(\omega t + \alpha).$$

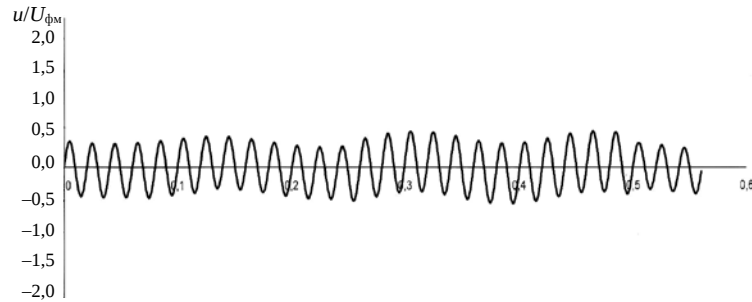


Рис. 3. Расчетная оциллограмма напряжения при отсутствии феррорезонанса

После этого начинают развиваться феррорезонансные перенапряжения. Здесь напряжение $e_3(t)$ выбрано в противофазе с напряжением шин РУ $\alpha = \pi$. Оциллограммы токов в ветвях расчетной схемы показаны на рис. 4. Для изучения влияния угла включения напряжения $e_3(t)$ был проведен расчет при сдвиге векторов напряжения на шине РУ и источника $e_3(t)$ на 90° ($\alpha = \pi/2$) с амплитудой предыдущего примера. Момент включения $e_3(t)$ также равен 0,3 с от начала расчета.

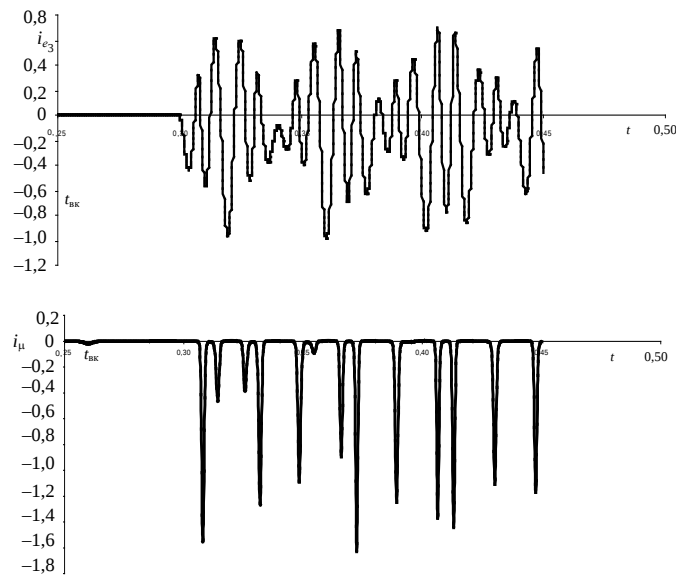


Рис. 4. Расчетные осциллограммы токов при получении феррорезонансного перенапряжения: $t_{\text{вк}}$ – момент включения $e_3(t)$; i_3 – ток источника $e_3(t)$; i_{μ} – ток намагничивания

Результаты расчета представлены на рис. 5, 6. Как видно из расчетных осциллограмм, изменением угла включения можно регулировать процессы развития феррорезонансного процесса.

Для установления влияния угла включения и амплитуды $e_3(t)$ на развитие феррорезонансного процесса необходимо продолжить расчет с одновременным изменением этих параметров.

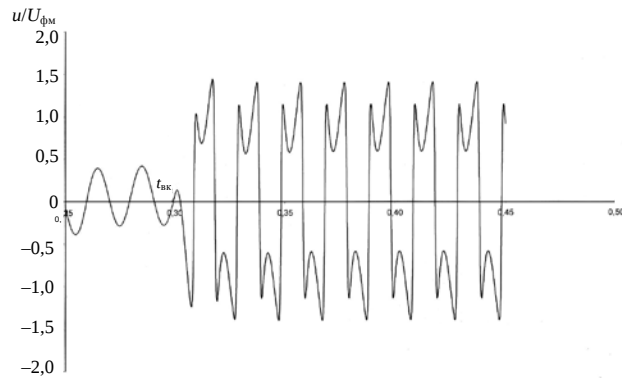


Рис. 5. Расчетные осциллограммы полученного феррорезонансного перенапряжения: $\alpha = \pi$

На основании одного включения и отключения источника $e_3(t)$ с целью выбора времени воздействия испытательного напряжения на изоляцию выполнены соответствующие расчеты. На рис. 7 показана расчетная осциллограмма полученного феррорезонансного перенапряжения при включении $e_3(t)$ в момент $t = 0,3$ с после отключения всех присоединений от системы шин РУ. Как видно из расчетной осциллограммы, развивается феррорезонанс, а в момент $t = 0,4$ с осуществляется отключение источника $e_3(t)$

от схемы, при этом форма напряжения в начале сохраняется, а в дальнейшем нормализуется. Амплитуда напряжения после отключения $e_3(t)$ равна U_Φ . Для получения начального значения напряжения ($\approx 0,6U_{\Phi M}$) необходимо при отключении источника $e_3(t)$ изменить значения сопротивления и индуктивности в цепи постороннего источника $e_3(t)$.

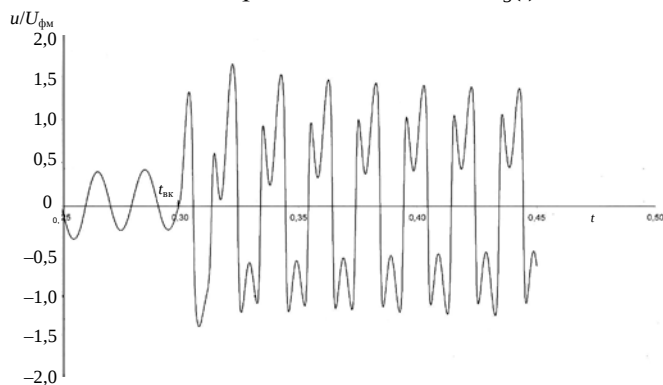


Рис. 6. Расчетная осциллограмма полученного феррорезонансного перенапряжения: $\alpha = \pi/2$

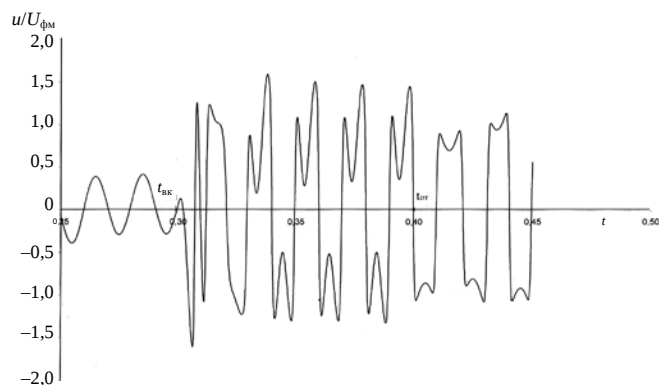


Рис. 7. Расчетная осциллограмма полученного феррорезонансного перенапряжения: $t_{от}$ – момент отключения $e_3(t)$

Предварительный анализ проведенных исследований показывает, что идея получения повышенного напряжения феррорезонансного типа при возбуждении ТН от постороннего источника для испытания электротехнического оборудования РУ в условиях эксплуатации представляется перспективной. На основе защитных устройств от феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений возможно осуществить испытания изоляции оборудования не только при указанных режимах, но и от внутренних перенапряжений. Для этого необходимо продолжение всесторонних исследований с учетом всех влияющих факторов, в том числе параметров РУ, при различных количествах присоединений на системах шин РУ и элементов защитных устройств.

ВЫВОД

На основе компьютерного моделирования феррорезонансных и кумулятивных процессов с учетом разработанного устройства фиксации и подав-

ления перенапряжений рекомендовано использование этого устройства для получения повышенного напряжения путем искусственного возбуждения феррорезонанса с целью испытания оборудования РУ в условиях эксплуатации. Выполнены предварительные исследования, показывающие возможности оценки основных параметров этого устройства с помощью предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д м и т р и е в, Е. В. Подавление феррорезонанса в распределительных устройствах с трансформатором напряжения и уменьшение кумулятивных перенапряжений / Е. В. Дмитриев [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 4. – С. 9–18.
2. Д м и т р и е в, Е. В. Ограничение феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений слаботочными резисторами в распределительных устройствах с трансформатором напряжения / Е. В. Дмитриев [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 5. – С. 29–39.
3. А н т и п о в, К. М. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / К. М. Антипов [и др.]. – М.: Союзтехэнерго, 1987. – С. 36.
4. А н т и п о в, К. М. Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110–500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / К. М. Антипов [и др.]. – Киев: Энергопроцесс, 1993. – С. 28.
5. М а к с и м о в, В. М. Исследование повреждаемости электромагнитных трансформаторов напряжения, разработка способов и технических средств их защиты в распределительных устройствах 110–750 кВ: автореф. ... дис. канд. техн. наук / В. М. Максимов. – Новосибирск, 1997. – С. 19.
6. Г а с а н о в а, С. И. Подавление феррорезонанса с трансформаторами напряжения / С. И. Гасанова [и др.] // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния. – Новосибирск, 2003. – Т. 2. – С. 202–210.
7. 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.
8. П а т. А з е р б а й д ж а н а № I 2004 0066, Баку, 27.04.2004 / С. И. Гасанова, А. М. Гашимов, Е. В. Дмитриев, И. Р. Пивчик // Бюл. изобр. Азербайджанской Республики. – 2003. – № 3. – (а 201 0207). – С. 72.
9. Г а ш и м о в, А. М. Численный анализ волновых процессов в электрических сетях / А. М. Гашимов // Новосибирск: Наука, 2003. – С. 148.
10. Г а с а н о в а, С. И. Компьютерное моделирование феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений в распределительных устройствах и защиты от них: автореф. ... дис. канд. техн. наук / С. И. Гасанова. – Баку, 2005.
11. М а р ч у к, Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1989. – С. 608.
12. Д ж у в а р л ы, Ч. М. Алгоритм расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей / Ч. М. Джуварлы [и др.] // Техническая электродинамика. – 1995. – № 1. – С. 62–66.
13. Г е р г е л ь, В. П. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем / В. П. Гергель, Р. Г. Стронгин // Нижний Новгород: изд-во Нижегородского госуниверситета, 2003. – С. 210.

Представлена лабораторией
физики и техники
высоких напряжений

Поступила 5.05.2006