

УДК 621.311

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ И  
КУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ****ГАСАНОВА С.И., ДМИТРИЕВ Е.В., АХМЕДОВ Х.М.***Институт Физики НАН Азербайджана*

Одной из весьма актуальных задач, требующих математического изучения, является задача о расчете кумулятивных перенапряжений при коммутации ненагруженных систем шин. Подобные задачи возникают при расчете ненагруженных участков систем шин с разъединителями. Отметим, что разработанный алгоритм по расчетам феррорезонансных явлений позволяет получить результаты с достаточно высокой точностью при отключении присоединений (от шин РУ с ТН и выключателями, оснащенными делителями напряжения). Поскольку для большинства практически важных задач, в том числе кумулятивных перенапряжений, не удастся построить аналитические решения, особенную актуальность приобретают численные методы моделирования данного класса сложных систем. Для построения экономических алгоритмов расчета феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений и получения оценки точности построенных приближенных решений, необходимо глубокое математическое изучение не только влияющих факторов, но и защитных устройств.

В настоящее время при решении более сложных задач используются высокоэффективные многопроцессорные вычислительные системы, которые, с одной стороны, позволяют создать модель любой сложности с точки зрения высокочастотного характера и, с другой стороны, построить ее структурную схему, образующую множество элементов и связей между ними, дать описание каждого элемента в виде системы дифференциальных алгебраических или логических уравнений, задать начальные условия и действующие на систему возмущающие воздействия.

Рассмотрим основные принципы построения алгоритма для многопроцессорного вычисления на примере переходных процессов в электрических цепях, характерных, например, для анализа высокочастотных измерений при коммутации выключателями ненагруженной системы шин с трансформаторами напряжения. В начале изложена математическая модель для исследования указанных процессов без учета коронирования проводов системы шин.

Предложена математическая модель для анализа высокочастотных перенапряжений при коммутации выключателями ненагруженной системы шин с трансформаторами напряжения.

При численных расчетах переходных процессов коммутации холостых шин с трансформаторами напряжения необходимо составить систему, включающую линию электропередачи, которая в расчетной схеме соединяет узел выключателя с узлом трансформатора напряжения, и уравнения узловых точек.

Для получения реальной картины перенапряжений при замыкании и размыкании контактов выключателя целесообразно осуществление расчетов по варианту трехфазной схемы. При этом предложенная математическая модель учитывает взаимные связи между фазами трехфазной цепи и неодновременную коммутацию фаз выключателя. Необходимость применения трехфазной расчетной схемы при анализе высокочастотных коммутационных перенапряжений была показана проведением

сравнительного анализа кратностей и характера перенапряжений с использованием трехфазной и однофазной схем замещения [2].

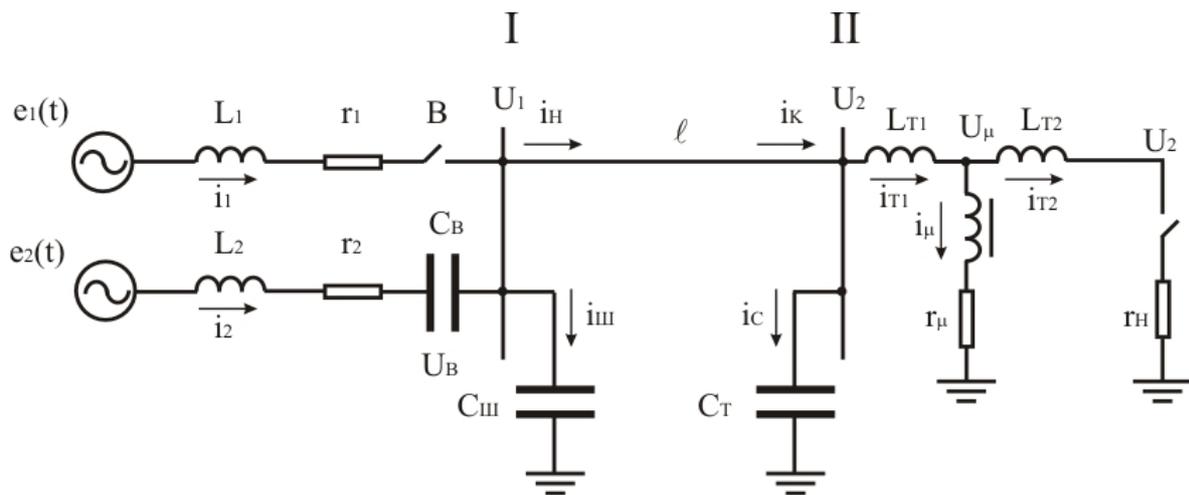


Рис.1. Расчетная схема

Для анализа высокочастотных перенапряжений предложена однолинейная расчетная схема, которая показана на рис. 1, где  $l_1, l_2(t)$  эдс, равные фазным напряжениям, выражены столбцовыми матрицами;  $C_B$  - емкость делителей напряжения выключателя, присоединенных к шинам, диагональная матрица;  $L_1, r_1$  - параметры присоединения, которое осуществляет повторное автоматическое включение шин, квадратные матрицы третьего порядка;  $L_2, r_2$  - параметры присоединений, которые отключены от системы шин, квадратные матрицы третьего порядка;  $C_{ш}, C_T$  - емкостная система шин и трансформатора напряжения, квадратные матрицы третьего порядка;  $L_{T1}, L_{T2}, r_{\mu}$  - параметры трансформатора напряжения, диагональные матрицы;  $r_{\mu}$  - балластная нагрузка, диагональная матрица;  $U_1, U_T, U_B, i_1, i_2, i_{ш}, i_c, i_{T1}, i_{T2}, i_{\mu}$  - напряжения и токи, столбцовые матрицы;  $l$  - длина участков шин между трансформатором напряжения и присоединением, осуществляющего повторное включение.

Систему уравнений для определения напряжений и токов в первом узле при замыкании контактов выключателя, осуществляющего включение шин, запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= L_1^{-1} \{l_1(t) - U_1 - r_1 i_1\}; \\ \frac{di_2}{dt} &= L_2^{-1} \{l_2(t) - U_B - U_1 - r_2 i_2\}; \\ \frac{dU_B}{dt} &= C_B^{-1} i_2 \\ \frac{dU_1}{dt} &= C_{ш}^{-1} i_{ш}^{-1} \quad ; \quad i_{ш} = i_1 + i_2 - i_{\mu} \end{aligned} \quad (1)$$

При разомкнутых контактах выключателя для осуществления расчета по системе (1) необходимо принимать  $l_1^{-1} = 0$ .

Определим токи в начальном участке  $l$  [3,4,5] по выражениям

$$i_{\mu} = (Z + Z_s)(U_1 + V_q)$$

Расчетные уравнения напряжений и токов в промежуточных точках участка  $l$  с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах записываются в виде

$$\begin{aligned} U_d &= 0,5(V_p - V_q) \\ i_d &= 0,5(Z + V_1)(V_p + V_q) \\ V_p &= U_p + Zi_p + \sum_{k=1}^n Z_{sk} X_k i_{jk} (x_1 t - r\tau) \\ V_q &= -U_q + ri_q + \sum_{k=1}^n Z_{sk} X_k i_{jk} (x_1 t - r\tau) \end{aligned}$$

Систему уравнений для определения напряжений и токов во втором узле запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{di_{r_1}}{dt} &= L_{T_1}^{-1}(U_T - U_\mu) \\ \frac{di_{r_2}}{dt} &= L_T^{-1}(U_\mu - U_2) \quad (4) \\ \frac{dU_1}{dt} &= C_T^{-1} i_{C_r} ; \quad i_{C_r} = i_k - i_{r_1} \end{aligned}$$

Нелинейная связь между потокосцеплением и током намагничивания трансформатора напряжения аппроксимируется в относительных единицах выражением (4)

$$i_\mu = \sum_{k=0}^n a_{2k+1} \varphi^{2k+1} \quad (5)$$

Если амплитуды тока намагничивания и потокосцепления при максимальном фазном напряжении обозначить через  $I_{\max}$  и  $\varphi_{\max}$ , то выражение (5) запишется в виде

$$i_\mu - I_{\max} \sum_{k=0}^n a_{2k+1} \left( \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right)^{2k+1} \quad (6)$$

где

$$\varphi_{\max} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi m}}{\sqrt{3} \cdot 3,14} ; \quad I_{\mu m} = K_f \cdot I_{\max}$$

Для определения потокосцепления из уравнения (6) можно написать

$$\frac{di_\mu}{dt} = j(\varphi) \cdot \frac{d\psi}{dt} \quad (7)$$

где

$$j(\psi) = \frac{I_{\max}}{\psi_{\max}} \cdot \sum_{k=0}^n a_{2k+1} \left( \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right)^{2k}$$

или

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\psi)^{-1} \cdot \frac{di_\mu}{dt} \quad (8)$$

Учитывая, что

$$i_\mu = i_{r_1} - i_{r_2} = i_k - i_c - i_{r_2} \quad (9)$$

и

$$U_\mu = \frac{d\psi}{dt} + r_\mu - i_\mu \quad (10),$$

получим

$$\begin{aligned}
 U_{\mu} &= \frac{d\psi}{dt} + r_{\mu} i_{\mu} = \\
 &= j(\psi)^{-1} \left[ \frac{di_{r_1}}{dt} - \frac{di_{r_2}}{dt} \right] + r_{\mu} i_{\mu} \quad (11)
 \end{aligned}$$

Системы уравнений (4) и (11) решаются совместно для определения напряжения и тока при отсутствии балластной нагрузки  $r_n$ . При наличии  $r_n$  к уравнениям добавляется

$$U_2 = r_n i_2$$

Ток  $i_k$  определяется из выражения

$$i_k = (Z + Z_n)^{-1} (U_T - V_p) \quad (12)$$

Для решения уравнения узловых точек и уравнения отрезка линии  $l$  необходимо выбрать расчетный шаг. При выборе расчетного шага необходимо учесть, что для решения уравнений линии был применен разностной метод второго порядка [3]. Это означает, что шаг расчета фиксированный. Поэтому дифференциальные уравнения узловых точек также решаются дифференциальным шагом. Решением этих уравнений был проведен выбор более подходящего метода и алгоритма расчета восстанавливаемых напряжений между контактами выключателя (5).

Результаты расчета переходных процессов системы холостых шин с трансформатором напряжения с учетом сложной конфигурации цепей и многократности включения с разными начальными условиями проиллюстрировали преимущества предложенного метода моделирования для исследования перенапряжений при автоматических включениях шин.

Алгоритм расчета, основанного на многопроцессорных вычислительных системах шин, представлен на рисунке 2, а его описание приводится ниже. На первом этапе осуществляется ввод исходных данных, которыми являются геометрические параметры линии, напряжение зажигания короны, длина зоны частот для моделирования поверхностного эффекта в проводах линии и земле, параметры присоединений системы шин и ТН, а также защитного устройства. Кроме того, задаются: число отключенных присоединений, характеристики намагничивания трансформатора ТН, условия осуществления АПВ и логические условия подключения или отключения защитных устройств. В дальнейшем проводится расчет напряжений и токов на II узловой точке по составленному уравнению для этой точки, напряжений и токов в промежуточных точках линия – II узел, напряжений и токов на III узловой точке. Таким образом, всю рассчитанную схему разделим на число узловых точек, равное числу процессов системы, как указано в [1]. Здесь обмен информации происходит в точках присоединений узловых точек.

Далее, методом итерации для каждого шага  $t+2\delta$  находятся напряжения и токи, потокосцепления, проверяются выполнения условия зажигания короны, подключения защитного устройства. Затем определяются процентные соотношения гармоник, продолжительного феррорезонансного процесса, его амплитуды, выполняются корректировки числа разбиения области линии, вводятся уравнения и начальные условия для присоединения, осуществляющего АПВ.

Для каждой узловой точки подготавливаются значения напряжений и токов для расчета новых значений на следующем шаге итерации. Далее расчет повторяется до определения новой величины изменения режима работы схемы.

Предложенный алгоритм реализован и введен в комплекс программ для расчета волновых электромагнитных процессов в сложных электрических сетях, разработанный в Институте Физики НАН Азербайджана на языке FORTRAN.

Применение высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, кроме ускорения расчета феррорезонансного и кумулятивного процессов, позволяет проводить анализ работы защитного свойства, быстро просчитывать

характеристики перенапряжений для переходных и установившихся режимов, для высокочастотного электромагнитного процесса и т.д. Программа, реализующая изложенный алгоритм феррорезонансного и кумулятивного перенапряжения, может быть успешно использована в качестве основного звена при компьютерном моделировании защиты от этих процессов.

Для обеспечения эффективной работы изложенного алгоритма необходимо соблюдение ряда требований. Эти требования являются общими для алгоритма при решении задачи на многопроцессорной технике [1] они следующие:

- внутренний параллелизм;
- равномерная загрузка;
- минимизация объема информации;
- логическая простота.

Для обеспечения надежной работы при одновременном решении уравнений I, II и III узловых точек расчетный шаг выбирается таким образом, что если I и III узловые точки работают с шагом  $2\delta$ , а II узловая точка с шагом  $2\tau/n$ , обмен информацией между узловыми точками осуществляется при достижении  $t$  значения  $t+2\tau$ . Здесь  $n$  необходимо брать как целое число, например 10,15 и т.д., максимальное число не ограничено. При обеспечении внутреннего параллелизма необязательно для I и III узловых точек выбирать шаг  $2\tau$ . Если возникает необходимость, для этих точек тоже можно уменьшить шаг в  $n$  раз. В этих условиях также операции обмена информации должны обеспечиваться при достижении  $t$  значения  $t+2\tau$ .

Для обеспечения условия равномерной загрузки процессоров расчетной сетки, построенной с целью определения напряжения и токов в узловых и промежуточных точках линии (III узловой точки), можно методом разбиения разделить сетку на несколько частей. Например, отдельные вычисления для начала и конца линии, а также ее промежуточных точек, или промежуточные точки также можно разделить на несколько частей.

Для обеспечения условия минимизации обмена информации значения напряжений и токов при фиксированных точках на время  $t + \frac{2\tau}{n}$  не обмениваются между процессорами. Значения напряжения и токов постоянно обмениваются при достижении  $t$  значения  $t+2\tau$ . Если расчетный шаг не изменится во время полного расчетного цикла, тогда обмен информации осуществляется на каждом шаге. При подключении защитного устройства обмен информации осуществляется одновременно и между III узловыми точками для правильного выбора начального условия для уравнений, описывающих работу этого устройства.

Для обеспечения условия логической простоты алгоритма при расчете феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений применением метода регулировки шага в сочетании с неизменяемым коэффициентом расчетного уравнения, необходимо обеспечивать связи с I и III узловыми точками линии, т.е. цепями с распределенными параметрами. Составление программы на базе уже отработанных программ, которые составлены в институте Физики и применены при решении многих задач, связанных с электромагнитными волновыми процессами в сложных сетях. Составленный алгоритм (рис.2) позволяет быстро написать дополнительную программу для конкретного защитного устройства.

Приведенные выше требования к алгоритму соответствуют реализованным решениям задач в период апробации разработанного защитного устройства и могут быть уточнены при определении эффективности этого устройства во время его эксплуатации в РУ энергосистем.

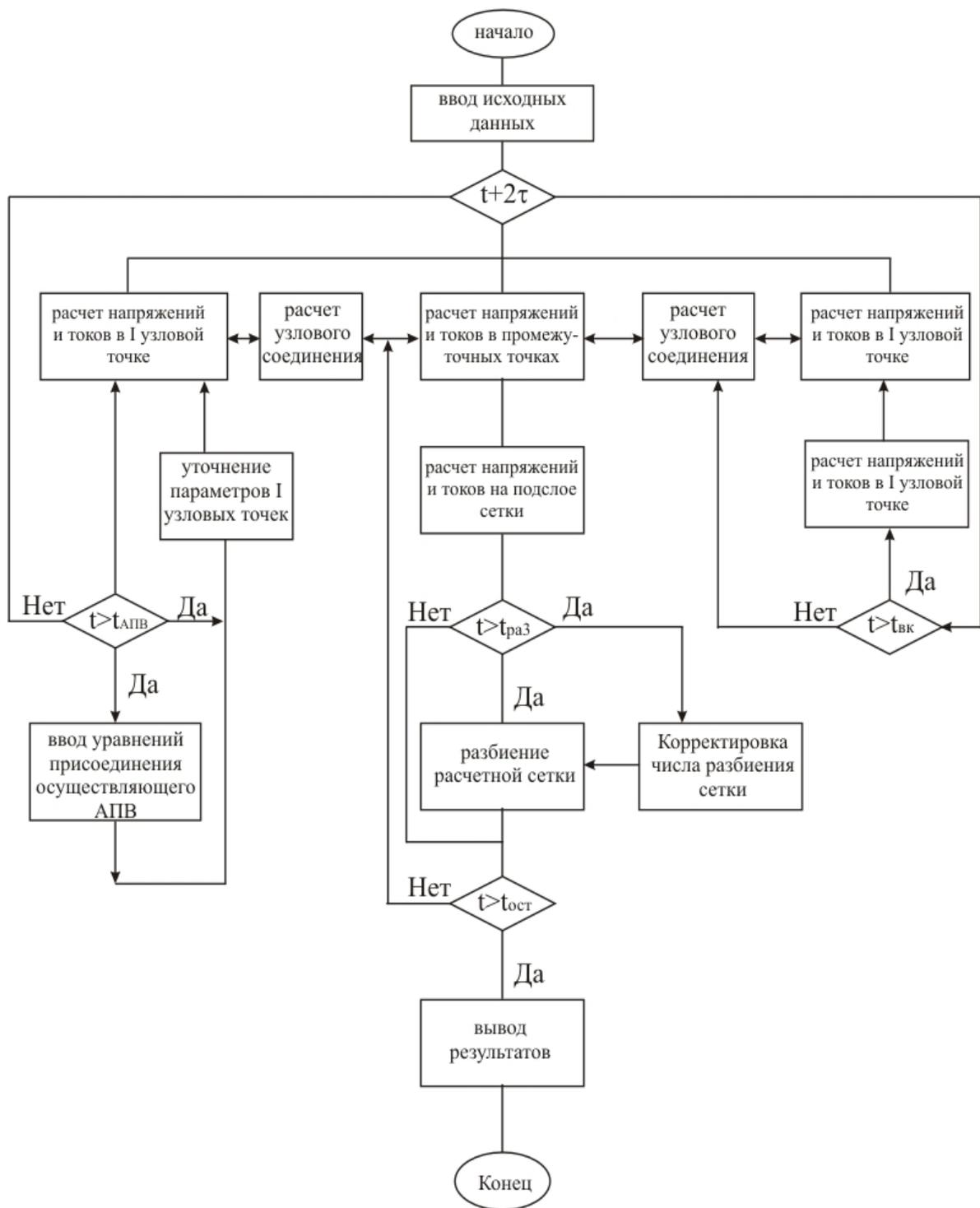


Рис.2. Алгоритм расчета феррорезонансных и кумулятивных перенапряжений и подавления направления их взаимного обмена значениями напряжений и токов

1. *Четверушкин Б.Н.* Высокопроизводительные многопроцессорные вычислительные системы./ ВЕСТНИК Российской Академии Наук, Москва, 2002, том 72, № 9, с. 786 - 794
2. *Ахмедов Х.М., Гашимов А.М., Дмитриев Е.В.* Учет поверхностного эффекта и короны при высокочастотных коммутационных перенапряжениях. // Доклады АН Азерб., 1998, LIV том, № 6-5, с. 89-94.
3. *Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Пивчик И.Р.* Численный анализ волновых процессов в электрических сетях – Новосибирск, «Наука», 2003.
4. *Джусварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Садыхов Б.М.* Расчетные формулы для уравнений линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны // Техническая электродинамика, 1991, № 1, с. 85 – 92
5. *Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Рустамов С.А.* Моделирование трансформатора с нейтралью, заземленной через нелинейный насыщающийся реактор.// В кн.: Сборник статей по электрофизике и электроэнергетике, Баку, Элм, 1984, выпуск 4, с. 136-144.
6. *Джусварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Рустамов С.А.* Алгоритм расчета подхода тока короткого замыкания к нулю и восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей.// Техническая электродинамика, 1995, № 1, с. 62-66.
7. *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», Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, Минск, № 4, 2003, с. 9-18.

## **ÇOXPROSESSORLU HESABLAMA SİSTEMLƏRİNİN FERROREZONANS VƏ KUMULYATİV PROSESLƏR ÜÇÜN İSTİFADƏSİNİN SƏMƏRƏLİLİYİ**

**HƏSƏNOVA S.İ., DMİTRİYEV Ye.V., ƏHMƏDOV X.M.**

Alqoritmə qoyulan və yuxarıda verilmiş tələblər, işlənilib hazırlanmış mühafizə qurğusunun sınaqdan çıxarılması (aprobasiya) müddətində məsələlərin realizə edilmiş həllərinə uyğundur və həmin qurğunun PQ enerji sistemlərində istismarı zamanı səmərəliliyinin müəyyən edilməsi zamanı dəqiqləşdirilə bilər.

## **EFFICIENCY OF USE OF MULTI-PROCESSOR COMPUTATION SYSTEMS FOR FERRORESONANCE AND CUMULATIVE PROCESSES**

**HASANOVA S.I., DMITRIYEV Ye.V., AKHMEDOV Kh.M**

Requirements to algorithm given above meet implemented solutions of tasks at the period of approbation of developed protective device and can be specified at determination of efficiency of this device during its operation in SG of energy systems.