

УДК 631.211

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ЦЕПИ КОММУТАЦИИ ЧАСТОТНОЗАВИСИМОГО РЕЗИСТОРА

БАБАЕВА Н.Р.

Институт Физики НАН Азербайджана

Предложен алгоритм анализа высокочастотных коммутационных перенапряжений при наличии в расчетной схеме частотнозависимого резистора, построенный на основе универсального алгоритма численного расчета волновых процессов в сложных электрических сетях с учетом диссипативных факторов.

Высокочастотные перенапряжения на элементах высоковольтной подстанции, как известно, является результатом высокоскоростной перезарядки емкости шин распределительного устройства (РУ) при электрических пробоях между контактами коммутационного аппарата [1,2]. Известны также перенапряжения, возникающие при коммутации двигателей, сопровождающихся высокими уровнями перенапряжений [3].

Для ограничения высокочастотных перенапряжений при коммутации предложено использовать резистор, сопротивление которого зависит частоты [4]. Эффективность использования частотнозависимого резистора при ограничении грозовых перенапряжений была показана в работе [5], где указано, что для ограничения перенапряжения резистора необходимо подключить резистор последовательно с защищаемым объектом.

В настоящее время при решении задач, связанных с высокочастотными коммутационными перенапряжениями, используется разностная схема, в которой между опорными точками вводятся дополнительные точки на линии с применением метода интерполяции функции одного переменного с помощью кубических сплайнов и высокоэффективные многопроцессорные вычислительные системы [6].

Однако, для осуществления анализа высокочастотного перенапряжения с учетом частотнозависимого резистора требуется особый алгоритм расчета при заданных условиях, независимо от режима процесса, который отвечает и по рабочим низким и по высоким частотам. Поэтому для осуществления расчета перенапряжений с учетом высокочастотного резистора был разработан алгоритм на основе выбранной схемы (рис.1.), который соответствует изложенному выше процессу.

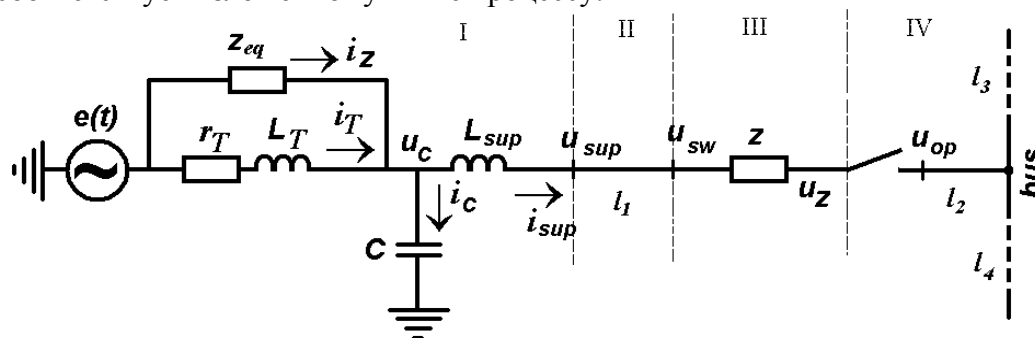


Рис.1. Резистор в коммутирующей цепи;

$e(t)$ – фазная ЭДС источника; u_c , u_{sup} – мгновенные значения напряжения на питающей стороне шин; u_{sw} , u_z , u_{op} – мгновенные значения напряжения на разъединителе соответственно с питающей и холостой стороны шин; i_T , i_c , i_{sup} , i_z – мгновенные значения токов, протекающих через соответствующие элементы расчетной схемы; z_{eq} – эквивалентное

волновое сопротивление отходящих от шин линий; r_T, L_T - параметры источника, l_1, l_2, l_3, l_4 - длины ненагруженных шин.

Для расчетной схемы можно записать систему уравнений, описывающих электромагнитные процессы в сосредоточенных элементах для I узла; система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_t}{dt} &= L_T^{-1} [e(t) - r_T i_t - u_c]; \\ \frac{du_c}{dt} &= C^{-1} i_c; \\ \frac{di_n}{dt} &= L_n^{-1} (u_c - u_n); \\ i_c &= i_T + i_z - i_n; \\ i_z &= Z_{\ominus}^{-1} [e(t) - u_c]; \\ u_p &= u_z + u_x, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $e(t)$ – фазная ЭДС источника; u_c, u_n - мгновенные значения напряжения на питающей стороне шин; u_p, u_x, u_z - мгновенные значения напряжения на коммутирующем аппарате соответственно с питающей и холостой стороны шин; i, i_T, i_c, i_n, i_z - мгновенные значения токов, протекающих через соответствующие элементы расчетной схемы.

Для III узла уравнения составляются в соответствии с выбранной расчетной моделью частотозависимого резистора и с целью изложения данного алгоритма принимают модель, аналогично модели Н.Н. Щедрина для учета поверхностного эффекта в земле и проводах при расчетах волновых процессов в цепях с распределенными параметрами. Расчетная модель и уравнения приведены в работе [4].

Волновые процессы на элементах с распределенными параметрами (участки шин) длиной l_1, l_2, l_3, l_4 описываются расчетными разностными уравнениями линий электропередачи с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах и коронирования проводов линии [8]:

$$\left. \begin{aligned} \left(1 + hz \sum_{k=1}^N G'_k \right) u_d + (z + z_s) i_d &= v_p; \\ - \left(1 + hz \sum_{k=1}^N G'_k \right) u_d + (z + z_s) i_q &= v_q. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} v_p &= u_p + z i_p + hz \left[\sum_{k=1}^N G_k'' (\pm U_3) + u_f \left(1 - \frac{U_3}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^N \sigma_k i_{f_{кп}} \right] + \sum_{k=1}^{\eta} z_{s_k} \chi_k \cdot i_{f_{пэ}}; \\ v_q &= -u_q + z i_q - hz \left[\sum_{k=1}^N G_k'' (\pm U_3) + u_f \left(1 - \frac{U_3}{|u_f|} \right) + \sum_{k=1}^N \sigma_k i_{f_{кп}} \right] + \sum_{k=1}^{\eta} z_{s_k} \chi_k \cdot i_{f_{пэ}}; \end{aligned}$$

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 ($x=0, x=l, t=0$ 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; $\tau = (L_0 C_0)^{0,5} h$ - функция, учитывающая соответственно поверхностный эффект в земле и проводах и корониро-

вание проводов линии. Отношение между этими переменными равно скорости движения электромагнитной волны вдоль линии без потерь и определяет расчетный шаг; u_f – напряжения на ЛЭП в точке x в момент $t-2\tau$, $i_{f_{кп}}$ – токи в ветвях модели КП в точке x линии в момент $t-2\tau$, $i_{f_{кк}}$ – токи в ветвях модели ПЭ в точке x линии в момент $t-2\tau$.

Для вычисления напряжений и токов U_n и i_n между узлами I и II используется второе уравнение расчетной формулы линии с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах и коронирования проводов и уравнения в I узловой точке. Уравнение для вычисления напряжения в начале II узловой точки имеет вид:

$$U_{II} = (1 + hZ \sum_{k=1}^N G'_k)^{-1} [(Z + Z_s) \cdot i_{II} - v_q] \quad (3)$$

Для обеспечения надежной сходимости для одновременного решения уравнений I-IV узловых точек расчетный шаг выбирается таким образом, чтобы на одном периоде получить полную информацию, т.е., удовлетворяющим теории В.А. Котельникова [9-10]. Считаем, что спектр частот кривая напряжения состоит из частоты от $f = 0$ до

$f_M = \omega_M / 2\pi$. Тогда $2\tau = \frac{1}{2f_M} = \frac{\pi}{\omega_M}$. В нашем случае, если принять, что $f_M = 200$

кГц, то $2\tau = 0.25 \cdot 10^{-6}$ сек. и $2h = 0.75$ км (рис.2). С учетом относительных погрешностей ε_i , ε_u расчетной формулы линии электропередачи в предложенном алгоритме определяется шаг расчета по длине в зависимости от числа ветвей модели поверхностного эффекта [11,12]. В этих работах показано, что с увеличением числа ветвей при заданном ε_i , ε_u (они одинаковы) шаг расчета уменьшается. При уменьшении шага расчета по длине $2h$ приближается к реальной длине холостой шины. Поэтому в алгоритме в начале по формулам В.А. Котельникова определяется шаг расчета по времени 2τ , затем определяется шаг расчета по длине $2h$ с учетом числа ветвей модели частотнозависимого резистора, и с учетом числа ветвей модели поверхностного эффекта в земле и проводах линии, и с учетом $\tau = v^{-1}h$ уточняется выбранный шаг по времени. При использовании такого приема необходимо учитывать, что после цикла расчета с шагом 2τ для узловых точек можно осуществлять расчет с шагом $\frac{2\tau}{m}$ и $\frac{2h}{m}$ в открытом направлении t , где m - целое число.

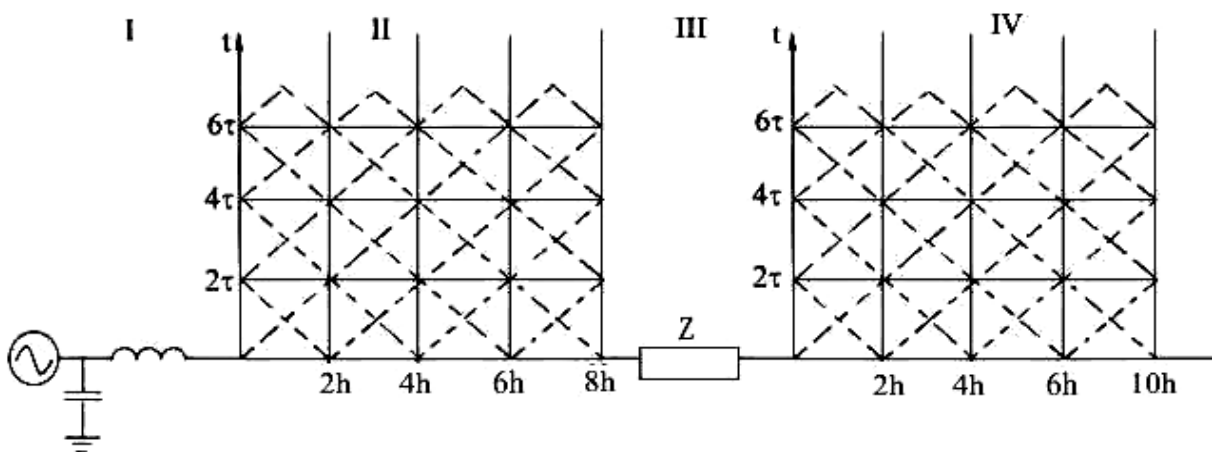


Рис.2. Расчетная сетка. Z- Частотнозависимый резистор

При численном решении уравнения, описывающие проходные процессы включения холостой шины и двигателя, возникает необходимость обеспечения сходимости. Естественно, абсолютно устойчивую разностную схему построить трудно. В принципе, и для этой цепи разрабатывается новый алгоритм, включающий низкочастотные и вы-

сокочастотные переходные процессы в одной расчетной схеме. Для обеспечения абсолютно устойчивого решения при выбранном расчетном шаге были использованы неявные схемы типа Рунге-Кутты третьего порядка аппроксимации по времени [13]. В данном алгоритме рассмотрены двухшаговые схемы.

Алгоритм расчета высокочастотных перенапряжений с учетом частотнозависимого резистора представлен на рис.3. Предложенный алгоритм реализован и введен в комплекс программ для расчета волновых процессов в сложных электрических сетях, разработанных в Институте Физики НАН Азербайджана. Результаты расчета, полученные с помощью предложенного алгоритма при трехфазном включении холостой системы шин и двигателя, совпадают с экспериментальными данными. Рассмотренный алгоритм может быть применен при исследовании других высокочастотных переходных процессов с учетом различных влияющих факторов и защитных элементов.

-
1. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защите от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России», Москва, 1998, 27 с.
 2. *Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике., Москва, 2003, 768 с.
 3. *Дегтярев И.Л.* Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями. Автореферат, Новосибирск, 2006
 4. *Гашимов А.М., Мехтиева Т.Р., Бабаева Н.Р.* Возможности ограничения высокочастотных перенапряжений при использовании частотнозависимого резистора. Энергетика Молдовы-2005, Кишинев, 2005, с. 265-269
 5. *Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А.* Резистор с частотной зависимостью для уменьшения перенапряжений. Труды второй всероссийской научно-технической конференции, Новосибирск, 15-17 октября, 2002, с. 52-59
 6. *Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Ахмедов Х.М.* Методика повышения точности расчета высокочастотных коммутационных перенапряжений. Проблемы энергетики, 2001, №1, с.24-28
 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
 8. *Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Пивчик И.Р.* Численный анализ волновых процессов в электрических сетях. Новосибирск, Наука, 2003, 147 с.
 9. *Долгинов А.И., Левина Л.С., Ступель А.И., Шатин В.С.* Расчет переходных процессов в электрических системах на ЭВМ, Москва, 1968, 103 с.
 10. *Котельников В.А.* О пропускной способности «Эфира» и проволоки в электросвязи. Успехи физических наук, 2006, т.176, №7, с. 762-770
 11. *Ахмедов Х.М.* Моделирование защиты от высокочастотных дуговых перенапряжений в распределительных устройствах. Автореферат, Баку, 2000.
 12. *Джусварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Рустамов С.А.* О разрешимости восстанавливающихся напряжений с учетом поверхностного эффекта. Известия АН Азербайджана, 1997, №1-3, с.9-13
 13. *Пинчуков В.И.* Абсолютно устойчивые схемы Рунге-Кутта третьего порядка аппроксимации. Журнал вычислительной математики и математической физики, 1999, том 39. №11, с. 1855-1868

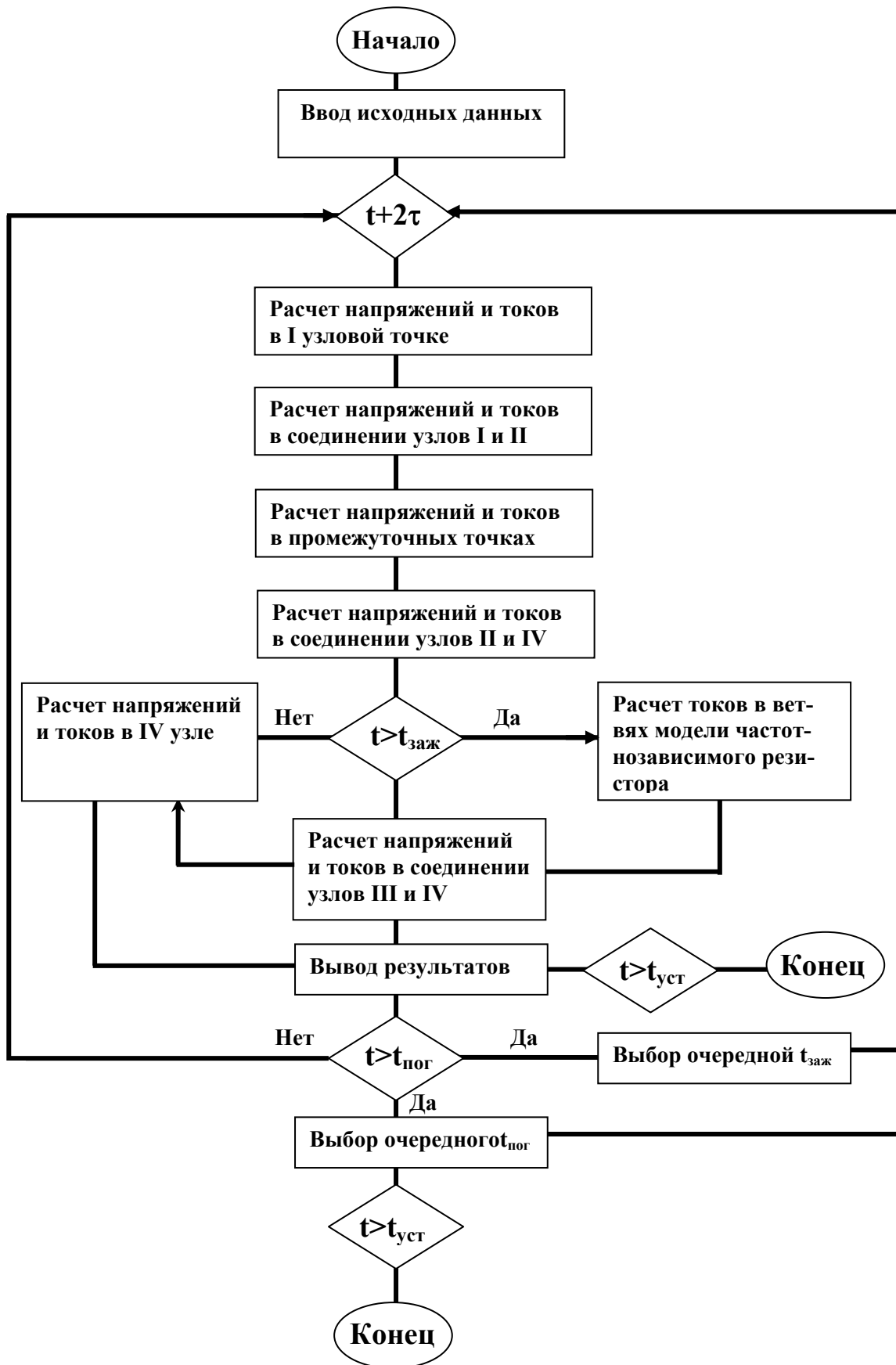


Рис.3. Схема алгоритма расчета высокочастотных коммутационных перенапряжений и их подавления с использованием частотнозависимого резистора. $t_{\text{зак}}$ – момент зажигания, $t_{\text{пог}}$ – момент погасания дуги контактами коммутирующего аппарата, $t_{\text{уст}}$ – выбранный момент установления режима коммутации

**KOMMUTASIYA DÖVRƏSİNDƏ TEZLİKDƏN ASILI OLAN REZİSTORDAN
İSTİFADƏ EDƏRKƏN YÜKSƏK TEZLİKLİ İFRAT GƏRGİNLİKLƏRİN
TƏHLİLİ ALQORİTMİ**

BABAYEVA N.R.

Dissipativ faktorları nəzərə alaraq mürəkkəb elektrik şəbəkələrində dalğa proseslərinin universal ədədi hesablama alqoritmini istifadə edərək, hesablama sxemində tezlikdən asılı olan rezistor tətbiq yüksək tezlikli kommutasiya ifrat gərginliklərinin təhlilinin alqoritmi təklif olunur.

**THE ANALYSIS ALGORITHM OF HIGH-FREQUENCY OVERSTRAIN AT
USE OF FREQUENCY-DEPENDENT RESISTOR IN COMMUTATION CHAIN**

BABAYEVA N.R.

The analysis algorithm of high-frequency commutation overstrains at presence of frequency-dependent resistor, constructed on the base of universal algorithm of numerous calculations of wave processes in complex electric net with taking under consideration of dissipative factors, and has been supposed.