

На правах рукописи

ГАШИМОВ АРИФ МАМЕД оглы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И
КОРОНЫ ПРИ РАСЧЕТАХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

- 05.09.05 - Теоретическая электротехника
05.14.02 - Электрические станции /электри-
ческая часть/, сети, электро-
энергетические системы и управ-
ление ими

ДИССЕРТАЦИЯ

в форме научного доклада на соискание
ученой степени доктора технических наук

Киев - 1992



00825670 (S)

Работа выполнена в Институте физики АН Азербайджанской
Республики / г. Баку /

Ученые консультанты: доктор технических наук, профессор,
академик АН Азербайджана Ч.М. Джугарлы,
доктор технических наук Е.В. Дмитриев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
И.А. Кулиев,
доктор технических наук, профессор
В.М. Постолатий,
доктор технических наук В.Ф. Резцов

Ведущая организация - НИИ постоянного тока /НИИПТ/,
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится "24" февраля 1993 г.,
в 14 часов, на заседании специализированного ученого совета
Д 016.30.03 в Институте электродинамики АН Украины /252680, Киев-57,
проспект Победы, 56, тел. 446-91-15/.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке
Института электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан "6" марта 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

В.С. Медин

ЛННБ ім. В. С. Стефаника
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Потребности постоянного повышения качества лабораторных исследований в области электроэнергетики требуют непрерывного развития теоретической электротехники, в том числе и одного из ее важнейших разделов - математического моделирования волновых процессов в многофазных электрических цепях с распределенными параметрами с учетом диссипативных факторов.

Уравнения многопроводной линии электропередачи с учетом диссипативных факторов записываются в виде

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + \psi, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где L_0 , C_0 - матрицы собственных и взаимных геометрических индуктивностей и емкостей ЛЭП; u , i - столбцовые матрицы напряжений и токов; ψ - функция, учитывающая влияние поверхностного эффекта в "земле" и проводах; φ - функция, учитывающая утечки с проводов линии передачи, в том числе и короны.

Трудность решения системы (1) связана с отсутствием аналитических выражений для ψ и φ . Существуют только эмпирические и полуэмпирические выражения для определения параметров электропередачи, зависящие от поверхностного эффекта в проводах и "земле" в функции от частоты и от короны в функции от частоты и напряжения. Поэтому для решения (1) не может быть использован метод характеристик.

Для численных расчетов волновых процессов в сложных электрических сетях Ч.М. Джуварлы и Е.В. Дмитриевым решением (1) вдоль кривой характеристического уравнения линии без потерь были получены следующие расчетные выражения

$$\begin{aligned} u_a - u_p + Z(t_a - t_p) + h(Z\varphi + \psi) + O(h^2) &= 0, \\ -u_a + u_q + Z(t_a - t_q) + h(-Z\varphi + \psi) + O(h^2) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Z = (L_0 C_0^{-1})^{0,5}$ - волновое сопротивление линии без потерь; u_a , u_p , u_q , t_a , t_p , t_q - напряжения и токи в точках рассматриваемой области решения уравнений (1) с координатами (x, t) , $(x-h, t-\tau)$, $(x+h, t-\tau)$ соответственно; h , τ - пространственная и временная переменные. Стоношение между этими переменными равно скорости движения электромагнитной волны вдоль линии без потерь и определяет расчетный шаг $\tau = (L_0 C_0)^{0,5} h$.

Остаточный член разностного аппроксимирующего уравнения (2) равен

$$O(h^2) = -\frac{h}{2} \left(L_0 \frac{\partial}{\partial t} \Phi \frac{\partial}{\partial x} \Phi + C_0 \frac{\partial}{\partial t} \Phi - \frac{\partial}{\partial x} \Phi \right). \quad (3)$$

В выражениях (2) диссипативные факторы учесть проще и для этого были получены необходимые уравнения. Недостатком их были сложность определения параметров модели поверхностного эффекта и связанная этим существенная погрешность модели. Что касается учета коронирования проводов линий электропередачи, то для этого были намечены лишь пути.

Исследования выполнены в соответствии с планом важнейших работ АН СССР по проблеме "электрофизика и электроэнергетика", шифр 1.9.2, раздел 1.9.2.2 на 1986-1990гг.; проблемно-тематическим планом многостороннего научного сотрудничества академий наук социалистических стран на 1986-1990гг. в области физико-технических проблем энергетики (тема Ш.Задание-Ш-1,4); перечнем энергетического оборудования, приборов, материалов, средств и систем управления, подлежащих разработке с 1990г. за счет централизованных капитальных вложений, позиция 132, темы №127, 128, (решения Минэнерго СССР, Гос.плана СССР, Госстроя СССР, ГКНТ СССР и Проектстройбанка СССР).

Целью работы является дальнейшее развитие теории электрических цепей с распределенными параметрами с учетом диссипативных факторов с применением к решению актуальных задач современных электроэнергетических систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

-разработка теоретических основ анализа и синтеза параллельно-последовательных r, L цепей для моделирования частотных характеристик поверхностного эффекта в проводах многопроводных линий электропередачи и "земле" как обратного провода. Выбор схем и оценка влияния базовых параметров на форму частотной характеристики и ее погрешность;

-разработка теоретических основ анализа и синтеза параллельно-последовательных r, C цепей для моделирования частотных и нелинейных характеристик короны на проводах многопроводных линий электропередачи. Выбор схем и оценка влияния базовых параметров на форму частотной и нелинейной характеристики модели и ее погрешность;

-совмещение математических моделей учета поверхностного эффекта и короны с расчетными формулами для численного расчета волновых процессов в сложных электрических цепях с распределенными параметрами, анализ погрешности, сходимости и устойчивости совмещенных расчетных формул;

-разработка эффективного алгоритма и пакета программ расчета волновых процессов в сложных электрических цепях с распределенными параметрами с учетом диссипативных факторов;

-применение разработанных алгоритма и пакета программ с целью иллюстрации их практической ценности для исследования на математических моделях новых технических решений по ограничению токов коротких замыканий, восстанавливаемых напряжений и феррорезонансных перенапряжений;

-практическая реализация новых технических решений, их опытная проверка и внедрение.

Основные положения выносимые на защиту. 1. Новые расчетные формулы для учета поверхностного эффекта в проводах многопроводной линии электропередачи и "земле".

2. Аналитический алгоритм определения параметров математической модели учета поверхностного эффекта в проводах многопроводной линии электропередачи и "земле", позволяющий осуществить модель, обладающую частотной характеристикой, отличающейся от заданной характеристики не более чем на 10%.

3. Математическая модель и расчетные формулы для учета утечки с проводов линии электропередачи при ее коронировании, в паузе между циклами коронирования и в отсутствии коронирования.

4. Аналитический алгоритм определения параметров математической модели учета коронирования проводов линии электропередачи, позволяющий осуществить модель, обладающую частотной характеристикой, отличающейся от заданной характеристики, полученной экспериментально или теоретически, не более, чем на 10% с зависимостью параметров от мгновенного значения перенапряжения.

5. Новые расчетные формулы для численного решения уравнений линий электропередачи с учетом диссипативных факторов: поверхностного эффекта в проводах и "земле" и коронирования проводов.

6. Результаты решения ряда актуальных практических задач энергосистем с помощью полученных расчетных формул; исследование восстанавливаемых напряжений и их ограничение в электрических сетях с ограничением токов однофазных коротких замыканий; исследование феррорезонансных перенапряжений и их предотвращение с трансформаторами напряжений, силовыми трансформаторами на отпайках, трансформаторами преобразовательных устройств; анализ условий работы ограничителей перенапряжений при феррорезонансе и причин повреждения резисторных уста-

новок в нейтрали преобразовательных подстанций.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается хорошей сходимостью результатов численных исследований с экспериментальными данными, полученными на моделях в лабораторных условиях и условиях энергосистем.

Методы исследования. При теоретических исследованиях использовались различные приближенные методы решения систем нелинейных гиперболических уравнений и методы линейной и нелинейной алгебры. Экспериментальные исследования по проверке теоретических положений выполнялись на физических моделях в лабораторных условиях и в действующих электрических сетях.

Научная новизна. Научная новизна выполненной работы заключается в следующем. Разработан новый метод аппроксимации частотных характеристик поверхностного эффекта в проводах и "земля" системой разностных уравнений с постоянными коэффициентами r, L , позволяющий вычислить постоянные коэффициенты каждого уравнения системы независимо и исключаящий необходимость применения для этого итерационных процессов. Показано, что для моделирования поверхностного эффекта из параллельных ветвей r, L , отличающихся от заданной частотной характеристики в области частот до 30000 Гц, число ветвей модели должно быть не менее четырех.

Впервые разработан аналитический метод расчета параметров модели поверхностного эффекта из четырех ветвей r, L , одна из ветвей которой принимается только индуктивной с выводом из модели постоянной составляющей активного сопротивления провода, включаемого с ней последовательно.

Точность моделирования повышается дополнением модели пятой ветвью с сопротивлением r , не увеличивающей количество расчетных уравнений. Величина сопротивления пятой ветви определяется аналитическим путем после определения параметров первых четырех ветвей.

Параметры модели определяются как корни системы комплексных уравнений четвертого порядка. Аналитическое решение найдено отделением мнимого значения первого корня с последующим сведением системы уравнений четвертого порядка к третьему и разделением системы комплексных уравнений на независимые подсистемы уравнений для вещественных и мнимых значений комплексных корней.

Разработан новый метод аппроксимации частотных и нелинейных характеристик явления короны на проводах линий электропередачи системой

разностных уравнений с нелинейными коэффициентами r, C , представляющих математическую модель физической модели, состоящей из параллельных ветвей r, C , соединенных последовательно и включенных между проводом и "землей" или между "проводами" через логический ключ и подпирającego напряжения с амплитудой, равной напряжению "зажигания" короны. Для определения мгновенных значений параметров модели использована сплайн-интерполяция (полином третьего порядка). Показано, что для моделирования частотных характеристик короны из параллельных ветвей r, C , отличающихся от заданной не более чем на 10% в области частот до 2000 Гц, число ветвей модели должно быть не менее четырех.

Впервые разработан аналитический метод расчета параметров модели короны, одна из ветвей которой принимается только емкостной для конкретных значений перенапряжений, служащих опорными точками для построения сплайн-интерполяции. Для повышения точности моделирования введены последовательное сопротивление для всей модели и дополнительная параллельная резистивная ветвь, не увеличивающие количество расчетных уравнений.

Параметры модели определяются как корни системы комплексных уравнений четвертого порядка. Аналитическое решение найдено отделением мнимого значения первого корня с последующим сведением системы уравнений четвертого порядка к двум подсистемам третьего порядка и нахождением раздельно мнимых и вещественных значений комплексных корней уравнений.

Получены новые расчетные формулы для численного решения уравнений многопроводной линии электропередачи с учетом диссипативных факторов: поверхностного эффекта в проводах и "земля" и короны на проводах.

Задача расчета волновых процессов в сложной электрической сети раскладывается на элементарные расчеты напряжений и токов в равноотстоящих на величину шага расчета точках электрической сети — промежуточных точках линий электропередачи (первая задача) и узловых точках сети (вторая задача). Последовательный расчет напряжений и токов в указанных точках на одном шаге по времени дает картину мгновенного значения напряжений и токов во всей сети. Расчет напряжений и токов во всех точках шаг за шагом по времени дает картину изменений напряжений и токов.

Первая задача описывается полученными расчетными формулами — системой алгебраических уравнений. Вторая задача — граничными условиями — системой алгебро-дифференциальных уравнений первого порядка. Для решения

актуальных задач электроэнергетики сформулированы различные граничные условия, учитывающие нелинейные характеристики силовых и измерительных трансформаторов, ограничителей перенапряжений, вентильных разрядников, нелинейных резисторов, шунтирующих контакты выключателей и устанавливаемых в нейтрали трансформаторов. Разработана методика ускорения расчетов восстанавливаемых напряжений в сложных электрических сетях без потери точности, заключающаяся в уменьшении шага расчета напряжений и токов в узловой точке с коммутационным аппаратом и отключаемом отрезке линии по длине, равному шагу расчета по пространственной переменной h .

Выполнен комплекс исследований восстанавливаемых напряжений между контактами выключателей в электрических сетях при изменении коэффициента заземления от 0,5 до 0,8 при наличии и отсутствии шунтирующих резисторов и резисторов в нейтрали, частичном заземлении нейтрали и заземлении нейтрали через реакторы, в том числе насыщающиеся. Показана перспективность заземления нейтрали через нелинейные сопротивления.

Выполнен комплекс исследований феррорезонансных явлений, способов и устройств их предотвращения и подавления с измерительными и силовыми трансформаторами, в т.ч. с преобразовательными, позволивший разработать соответствующие технические средства.

Разработаны на уровне изобретений новые технические средства для ограничения токов асимметричных коротких замыканий на землю, восстанавливаемых напряжений, подавления и предотвращения феррорезонансных перенапряжений.

Практическая ценность. Использование научных положений, обоснованных в работе, позволяет: в значительной мере формализовать процедуры численных расчетов волновых процессов в электрических сетях с учетом диссипативных факторов и исполнительных структур; разработать и внедрить алгоритмы и пакеты программ, значительно повышающие точность лабораторных исследований, что открывает широкие перспективы для разработчиков в методологическом аспекте; проводить сравнительную оценку различных вариантов исполнительных структур электрических систем; определять области рационального применения тех или иных схемотехнических решений систем защит от перенапряжений, в т.ч. феррорезонансных, ограничения токов коротких замыканий и восстанавливаемых напряжений; определять параметры волновых процессов с наименьшими погрешностями для выбора уровней функционирования различных

средств релейной защиты и автоматики; определить места повреждения на линиях электропередачи.

Реализация результатов работы. Результаты работы по исследованию восстанавливающихся напряжений вошли составной частью в комплекс работ по разработке и внедрению бета-ловых шунтирующих резисторов, частичного заземления нейтрали через резисторы и заземления нейтрали через реакторы. Результаты использованы также при разработках "Руководящих указаний по ограничению токов однофазных коротких замыканий в электрических сетях 110-220кВ энергосистем" и "Методических указаниях по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения", при организации производства устройств выявления и подавления феррорезонансных перенапряжений с измерительными трансформаторами (НПО "Преобразователь", г. Запорожье) и силовыми трансформаторами (НПО "Каспий", г. Баку).

Результаты работы вошли в учебные пособия по курсу ТОЭ используемые в вузах республики.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на:

- Пятой Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, г. Ташкент, 1975г.;
- Всесоюзном научно-техническом совещании "Применение резисторов в энергосистемах", г. Баку, 1978г.;
- Внездном заседании бюро Научного Совета по комплексной проблеме "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" отделения физико-технических проблем энергетики АН СССР, г. Баку, 1978г.;
- Всесоюзном совещании "Применение в электроэнергетике мощных бета-ловых резисторов и резисторных установок", г. Новосибирск, 1980г.;
- Всесоюзном семинаре "Методы расчета электромагнитных переходных процессов и электрических полей в сетях высокого напряжения", г. Каунас, 1985г.;
- III Международном симпозиуме "Токи короткого замыкания в электроэнергетических системах", г. Сулеви (Польша), 1988г.;
- Совещании-семинаре Проблемной Комиссии Научного сотрудничества АН социалистических стран "Физико-технические проблемы энергетики", г. Киев, 1989г.;
- IV Международном симпозиуме "Токи короткого замыкания в электроэнергетических системах", г. Льеж (Бельгия), 1990г.;

-Научных семинарах Института физики АН Азербайджанской республики.
Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 52 работах, в т.ч. 9 авторских свидетельств, а также вошли в 10 отчетов по НИР и хозяйственным работам.

1. ПАРАМЕТРЫ МНОГОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Известно, что параметрами многопроводной линии электропередачи являются матрицы индуктивностей, сопротивлений, емкостей и проводимостей. Эти параметры для реальной линии являются переменными и нелинейными вследствие поверхностного эффекта в проводах и "землз", коронирования проводов, изменений погодных условий, загрязнения и т.д. Для определения этих параметров могут быть использованы различные расчетные, полумпирические и эмпирические формулы, полученные И.Р.Карсоном, Р.Руденбергом, Ф.Поллячек, М.В.Костенко, В.И.Попковым, Л.С.Перельманом, Г.И.Александровым, И.К.Федченко и др. Каждый собственный и взаимный параметр представляется как сумма:

$$L_{\text{об}} = L_{\text{об}} + L_{\text{np об}}, \quad L_{\text{вз}} = L_{\text{об}} + L_{\text{вз}}, \quad r_{\text{об}} = r_{\text{np об}} + r_{\text{з об}}, \quad r_{\text{вз}} = r_{\text{з вв}},$$

$$C_{\text{об}} = C_{\text{об}} + \Delta C_{\text{об}}, \quad C_{\text{вз}} = C_{\text{об}} + \Delta C_{\text{вз}}, \quad g = \Delta g_{\text{об}}, \quad g_{\text{вз}} = \Delta g_{\text{вз}},$$

где $L_{\text{об}}$, $L_{\text{вз}}$, $C_{\text{об}}$, $C_{\text{вз}}$ -геометрические параметры линии электропередачи, L_{np} , r_{np} - параметры провода, зависящие от частоты, $L_{\text{з об}}$, $r_{\text{з об}}$, $L_{\text{з вв}}$, $r_{\text{з вв}}$ - зависящие от частоты параметры, характеризующие "землю", $\Delta C_{\text{об}}$, $\Delta C_{\text{вз}}$, $\Delta g_{\text{об}}$, $\Delta g_{\text{вз}}$ -параметры, определяющие увеличение емкости линии и утечки в связи с коронированием проводов и зависящие от частоты и перенапряжений.

Геометрические параметры определяются выражением

$$L_{\text{об}} = (\mu_0 / 2\pi) \ln(2h/r_i) \text{ Гн/км}, \quad L_{\text{вз}} = (\mu_0 / 2\pi) \ln(D_{\text{in}} / a_{\text{in}}) \text{ Гн/км}, \quad (4)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, h , r_i , D_{in} , a_{in} - геометрические параметры ЛЭП.

Индуктивность и сопротивление провода определяются выражением:

$$L_{\text{np}} = \frac{2K_c}{10^4 x} \frac{a_1 a_2 + a_3 a_4}{a_2^2 + a_4^2} \text{ Гн/км}, \quad r_{\text{np}} = \frac{2wK_c}{10^4 x} \frac{a_4 a_1 - a_2 a_3}{a_3^2 + a_4^2} \text{ Ом/км}, \quad (5)$$

$$a_1 = \text{ber} x, \quad a_2 = -\text{bet} x, \quad a_3 = \text{ber}' x, \quad a_4 = -\text{bet}' x, \quad x = r_k (w \mu_{\text{np}} \rho_{\text{np}}^{-1})^{0,5},$$

где K_c - коэффициент скрутки, r_k - радиус провода, ρ_{np} - удельное сопротивление материала провода, μ_{np} - абсолютная магнитная проницаемость провода.

Индуктивность L_3 и сопротивление r_3 могут быть получены из выражений

$$r_{3\text{сб}} + j\omega L_{3\text{сб}} = j \frac{\omega \mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h_n \lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j \frac{\omega \mu_0}{\rho_3}}} d\lambda, \quad (6)$$

$$r_{3\text{вз}} + j\omega L_{3\text{вз}} = j \frac{\omega \mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(h_t + h_n)\lambda} \cos \alpha_{tn} \lambda}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j \frac{\omega \mu_0}{\rho_3}}} d\lambda,$$

где h_t, h_n - высота подвеса, t -го и n -го проводов, ρ_3 - удельное сопротивление земли, α_{tn} - расстояние между проводами. Возможно определение параметров и по иным формулам.

Дополнительные емкость ΔC и утечка Δg могут быть вычислены по эмпирическим формулам:

$$\Delta C = 2,4 \left(\frac{50}{f}\right)^{0,42} \left(\frac{U_M}{U_\Phi} - 1\right) 10^3 \frac{\pi \Phi}{\text{км}}, \Delta g = 0,83 \left(\frac{f}{50}\right)^{0,62} [1 - e^{-(\frac{U_M}{U_\Phi} - 1)}] \frac{1}{\text{Мом км}}, \quad (7)$$

где f - частота, Гц, U_M/U_Φ - кратность перенапряжений.

Непосредственное использование этих выражений в уравнениях линий электропередачи с частными производными невозможно, поэтому и возникла задача моделирования поверхностного эффекта и короны как диссипативных факторов.

2. РАЗНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УЧЕТА ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В ПРОВОДАХ И ЗЕМЛЕ МНОГОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ [3, 12, 29, 43].

Матрица падений напряжения на участках линии электропередачи длиной h (где h - шаг расчета по пространственной переменной), может быть представлена в виде

$$\Phi = \begin{pmatrix} u_{a1} \\ u_{a2} \\ \vdots \\ u_{am} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{a11} + u_{a12} + \dots + u_{a1m} \\ u_{a21} + u_{a22} + \dots + u_{a2m} \\ \dots \\ u_{am1} + u_{am2} + \dots + u_{amm} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Здесь u_{snn} - падение напряжения от собственного тока, u_{sln} - падение напряжения в проводе l от тока в проводе n ;

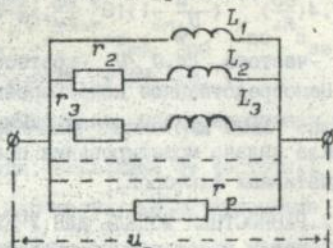
$$i=n-1, 2, \dots, m.$$

Как известно, для учета поверхностного эффекта может быть использована модель Шедрина Н.Н., в которой сопротивление $r(\omega) + j\omega L(\omega)$ с переменными коэффициентами, зависящими от частоты, заменяется параллельно соединенными элементами r , L с постоянными коэффициентами таким образом, что проводимость модели $\sum_{k=1}^p (r_k + j\omega L_k)$ в заданном диапазоне частот соответствовала проводимости моделируемого сопротивления (рис.1). Из этого условия параметры модели могут быть определены решением системы уравнений:

$$\sum_{k=1}^p (r_k + j\omega L_k)^{-1} = r(\omega_1) + j\omega_1 L(\omega_1), \quad i=1, 2, \dots, p, \quad (9)$$

где p - число ветвей модели и число уравнений (9).

Рассматривая падение напряжения, например $u_{i,m}$ в (8), для каждой ветви модели можно составить систему уравнений

$$\begin{aligned} u_{a_{i,m}} &= L_1 \frac{dt_1}{dt} + r_1 t_1, \\ u_{a_{i,m}} &= L_2 \frac{dt_2}{dt} + r_2 t_2, \\ &\dots \\ u_{a_{i,m}} &= L_p \frac{dt_p}{dt} + r_p t_p, \end{aligned} \quad (10)$$


Эта система заменяется разностной с погрешностью $O(\tau^2)$. Если при этом первую ветвь взять только индуктивной, а последнюю только резистивной, то

$$\begin{aligned} u_{a_{i,m}} &= 0,5L_1 h\tau^{-1} [t_1(t) - t_2(t-2\tau)] + O(\tau^2), \\ u_{a_{i,m}} &= 0,5L_2 h\tau^{-1} [t_2(t) - t_2(t-2\tau)] + \\ &+ 0,5hr_2 [t_2(t) - t_2(t-2\tau)] + O(\tau^2), \end{aligned} \quad (11)$$

$$u_{a_{i,m}} = r_p t_p(t),$$

где

$$O(\tau^2) = L_k (L_0 C_0)^{0,5} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\tau^{v+1}}{(v+1)!} \frac{dt^{v+1}}{dt^{v+1}}. \quad (12)$$

Из системы (11) получим

$$\begin{aligned} t_1(t) &= Z_{a_1}^{-1} u_{a_{1m}} + \alpha_1 t_1(t-2\tau), \\ t_2(t) &= Z_{a_2}^{-1} u_{a_{2m}} + \alpha_2 t_2(t-2\tau), \end{aligned} \quad (13)$$

$$t_p(t) = Z_{a_p}^{-1} u_{a_{pm}} + \alpha_p t_p(t-2\tau),$$

где

$$Z_{a_1} = 0,5 \tau^{-1} L_1, \quad Z_{a_2} = 0,5 v(L_2 + \tau r_2), \dots, Z_{a_p} = r_p^{-1} h^{-1}, v = h\tau^{-1},$$

$$\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = (L_2 - \tau r_2)(L_2 + \tau r_2)^{-1}, \dots, \alpha_p = 0.$$

Из (13) определяется полный ток в точке $d(x,t)n$ -го провода

$$t_n(t) = t_1(t) + t_2(t) + \dots = \sum_{k=1}^p Z_{a_k}^{-1} u_{a_{km}} + \sum_{k=1}^p \alpha_k t_k(t-2\tau), \quad (14)$$

откуда

$$u_{a_{1m}} = \left(\sum_{k=1}^p Z_{a_k}^{-1} \right)^{-1} [t_n(t) - \sum_{k=1}^p \alpha_k t_k(t-2\tau)]. \quad (15)$$

Аналогичным образом можно получить выражение $u_{a_{pn}}$ для собственного элемента модели.

Подстановка выражений для $u_{a_{11}}$ и $u_{a_{1n}}$ в первую строку (8)

даёт:

$$\begin{aligned} u_{a_1} &= Z_{a_{11}} t_1(t) + Z_{a_{12}} t_2(t) + \dots + Z_{a_{1m}} t_m(t) - \\ &- Z_{a_{11}} \sum_{k=1}^p \alpha_k t_k(t-2\tau) - \dots - Z_{a_{1m}} \sum_{k=1}^p \alpha_k t_k(t-2\tau), \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$Z_{a_{11}} = \left(\sum_{k=1}^p Z_{a_k}^{-1} \right)^{-1}, \dots, Z_{a_{1m}} = \left(\sum_{k=1}^p Z_{a_{km}}^{-1} \right)^{-1}.$$

После подстановки выражений для $u_{a_{1n}}$ и $u_{a_{pn}}$ в (8) получим:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} u_{a_1} \\ u_{a_2} \\ \vdots \\ u_{a_m} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} Z_{a_{11}} & Z_{a_{12}} & \dots & Z_{a_{1m}} \\ Z_{a_{21}} & Z_{a_{22}} & \dots & Z_{a_{2m}} \\ \hline Z_{a_{m1}} & Z_{a_{m2}} & \dots & Z_{a_{mm}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} t_1(t) \\ t_2(t) \\ \vdots \\ t_m(t) \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^p \begin{vmatrix} Z_{a_{11}} x_{k11} & Z_{a_{12}} x_{k12} & \dots & Z_{a_{1m}} x_{k1m} \\ Z_{a_{21}} x_{k21} & Z_{a_{22}} x_{k22} & \dots & Z_{a_{2m}} x_{k2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{a_{m1}} x_{km1} & Z_{a_{m2}} x_{km2} & \dots & Z_{a_{mm}} x_{kmm} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} t_k(t-2\tau) \\ t_k(t-2\tau) \\ \vdots \\ t_k(t-2\tau) \end{vmatrix},$$

т.е.

$$u_a = Z_a t(t) - \sum_{k=1}^p Z_{a_k} x_k t_k(t-2\tau). \quad (18)$$

Выражение (18) представляет искомую математическую модель.

Таким образом, получена разностная математическая модель, учитывающая поверхностный эффект, для использования которой необходимо определить параметры Z_a и x_k и установить количество ветвей модели с заданной точностью моделирующей частотные характеристики.

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА [1,7,40]

Для определения Z_a и x_k сначала должны быть вычислены параметры r_k , L_k модели поверхностного эффекта. Эти параметры должны быть вычислены при условии совпадения частотных характеристик модели и реальной линии. Очевидно, что для определения значений r_k , L_k необходимо составить соответствующее число уравнений (9) с отличающимися друг от друга величинами w от w_1 до w_p . При этом выбираемое значение w_1 произвольно, но от выбранных значений w_i зависит точность моделирования во всем диапазоне моделирования.

3.1. Модель поверхностного эффекта из трех ветвей r_k , L_k .

Ниже приводятся расчетные формулы для вычисления параметров модели. В этих формулах введены вспомогательные соотношения и обозначения

$$R_k = r_k (r_k^2 + w_1^2 L_k^2)^{-1}, \quad C_k = w_1 L_k (r_k^2 + w_1^2 L_k^2)^{-1}, \quad x_k = L_k \varepsilon_k,$$

$$\varepsilon_k = r_k^{-1}, \quad Y_1 = x_1 + x_2 + x_3, \quad Y_2 = x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_3, \quad Y_3 = x_1 x_2 x_3,$$

$$k=1, 2, 3., \quad i=1, 2, 3.$$

Сначала определяются Y_1 , Y_2 , Y_3 из матричного уравнения

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

элементы которой вычисляются по формулам

$$a_{i1} = R_i - R_{\nu}, \quad \nu=2,3, \quad i=1,2,$$

$$a_{31} = \sum_{\nu=1}^2 \sigma_{\nu} (w_{\nu+1} L_{\nu+1} - w_{\nu} L_{\nu}),$$

$$a_{i2} = w_i L_i - w_{\nu} L_{\nu}, \quad \nu=2,3, \quad i=1,2,$$

$$a_{32} = \sum_{\nu=1}^2 \sigma_{\nu} (w_{\nu}^2 R_{\nu} - w_{\nu+1}^2 R_{\nu+1}),$$

$$a_{i3} = w_{\nu+1}^2 R_{\nu+1} - w_{\nu}^2 R_{\nu}, \quad \nu=i=1,2,$$

$$a_{33} = \sum_{\nu=1}^2 \sigma_{\nu} (w_{\nu}^3 L_{\nu} - w_{\nu+1}^3 L_{\nu+1}), \quad \nu=i=1,2,$$

$$f_i = w_{\nu}^{-1} L_{\nu} - w_{\nu+1}^{-1} L_{\nu+1}, \quad \nu=i=1,2,$$

$$f_3 = \sum_{\nu=1}^2 \sigma_{\nu} (R_{\nu} - R_{\nu+1}),$$

где

$$\sigma_1 = (w_1^2 - w_2^2)^{-1}, \quad \sigma_2 = (w_2^2 - w_3^2)^{-1}.$$

После определения y_1, y_2, y_3 находим x_1, x_2, x_3 из кубического уравнения $x^3 - y_1 x^2 - y_2 x - y_3 = 0$.

Затем составляем дополнительное матричное уравнение для определения проводимостей g_1, g_2, g_3 .

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где

$$b_{ij} = 1 - w_j^2 y_3^{-1} x_j^{-1},$$

$$b_{2j} = y_1 - x_j,$$

$$b_{3j} = (w_2^2 - w_1^2) y_3 x_j^{-1}, j=1, 2, 3,$$

$$\lambda_1 = R_3(1 - w_3^2 y_2) + w_3 L_3 (y_1 - w_3^2 y_3),$$

$$\lambda_2 = R_3 (y_1 - w_3^2 y_3) + w_3 L_3 (y_2 - w_3^2 y_3),$$

$$\lambda_3 = R_1 - R_3 + (w_1 L_1 - w_2 L_2) y_1 + (w_2^2 R_2 - w_1^2 R_1) y_2 + (w_2^2 L_2 - w_1^2 L_1) y_3.$$

После определения g_1, g_2, g_3 можно вычислить необходимые параметры модели r_k , а затем $L_k = r_k x_k$.

Полученные расчетные формулы позволяют определять параметры модели поверхностного эффекта в "земле" и проводах, состоящей из трех ветвей r_k, L_k . Максимальная погрешность этой модели в диапазоне 0-2000 Гц менее 5%. С расширением диапазона погрешность модели резко увеличивается. Поэтому она может быть использована при расчетах коммутационных переходных процессов. При расчетах восстанавливавшихся напряжений точность ее недостаточна, поэтому необходима модель с большим числом ветвей.

3.2. Модель из четырех ветвей r_k, L_k .

В этой модели принято $r_4 = L_4 = 0$ и последовательность определения параметров модели такова же, как и для модели из трех ветвей. Принимая те же самые вспомогательные соотношения и обозначения для коэффициентов системы (19), получим нижеследующие выражения

$$\alpha_{i1} = \sum_{v \neq i}^2 \sigma_v (w_{v+1} L_{v+1} - w_{v-1} L_{v-1}), \quad i=1, 2,$$

$$\alpha_{31} = \sum_{v \neq 1}^2 \sigma_{v+3} (R_v - R_{v+1}),$$

$$\alpha_{i2} = \sum_{v \neq i}^2 \sigma_v (w_{v+1}^2 R_{v+1} - w_{v-1}^2 R_{v-1}), \quad i=1, 2,$$

$$\alpha_{32} = \sum_{v \neq 1}^2 \sigma_{v+2} (w_v L_v - w_{v+1} L_{v+1}),$$

$$\alpha_{i3} = \sum_{v \neq i}^2 \sigma_v (w_v^3 L_v + w_{v+1}^3 L_{v+1}), \quad i=1, 2,$$

$$\alpha_{33} = \sum_{\nu=1}^2 \alpha_{\nu+2} (w_{\nu+1}^2 R_{\nu+1} - w_{\nu}^2 R_{\nu}),$$

$$f_{\epsilon} = \sum_{\nu=1}^2 \alpha_{\nu} (R_{\nu} - R_{\nu+1}), \quad \epsilon=1,2,$$

$$f_3 = \sum_{\nu=1}^2 \alpha_{\nu+2} (w_{\nu}^2 R_{\nu} - w_{\nu+2}^2 R_{\nu+2}),$$

где

$$\alpha_{\nu} = (w_{\nu}^2 - w_{\nu+1}^2), \quad \nu=1,2,3.$$

После вычисления Y_1, Y_2, Y_3 находим x_1, x_2, x_3 .
Далее определяется r_4 ,

$$r_4 = \alpha_4 Y_3 \left[\sum_{\nu=1}^3 \gamma_{\nu} Y_{\nu} + (w_4^{-1} L_4 - w_1^{-1} L_1) \right], \quad (21)$$

где

$$\alpha_4 = (w_4^2 - w_1^2), \quad \gamma_1 = R_1 - R_4, \quad \gamma_2 = (w_1 L_1 - w_4 L_4), \quad \gamma_3 = w_4 R_4 - w_1 R_1.$$

Из уравнения (20) определяются $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. В этом случае коэффициенты системы (20) определяются из нижеследующих выражений

$$b_{1j} = Y_{\epsilon} - x_j,$$

$$b_{2j} = 1 - w_2^2 Y_3 x_j^{-1},$$

$$b_{3j} = Y_j x_j, \quad j=1,2,3,$$

$$\lambda_1 = (R_1 - \beta_4) Y_1 + w_1 L_1 Y_2 + (w_1^2 \beta_4 - w_1^2 R_1) Y_3 - w_1^{-1} L_1,$$

$$\lambda_2 = w_2 L_2 Y_1 + (w_4^2 R_4 - w_2^2 R_2) Y_2 - w_2^2 L_2 Y_3 - \beta_4 + R_2,$$

$$\lambda_3 = \alpha_6 \sum_{\nu=1}^3 \eta_{\nu} Y_{\nu} - \beta_4 Y_2,$$

где

$$\alpha_6 = (w_4^2 - w_2^2)^{-1}, \quad \eta_1 = (w_3 L_3 - w_4 L_4), \quad \eta_2 = (w_4^2 R_4 - w_3^2 R_3), \quad \eta_3 = (w_4^3 L_4 - w_3^3 L_3),$$

После определения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ можно вычислить необходимые параметры r_k, L_k .

Исследование погрешности модели показало, что эта модель приемлема для моделирования поверхностного эффекта в "земле" и проводах в диапазоне 0-30000 Гц. Погрешность этой модели при частотах больше 30 кГц сильно возрастает и эта модель не может быть использована при расчетах восстанавливаемых напряжений.

Для расширения диапазона моделирования до 200 кГц с целью

удовлетворения требованиям моделирования поверхностного эффекта при расчетах восстанавливающихся напряжений дополнительно к четырем ветвям r_k, L_k включена последовательная ветвь L_5 , величина индуктивности которой принимается равной индуктивности провода или "земли", как обратного провода при частоте 150 кГц. Остальные параметры определяются по формулам для модели четырех ветвей r_k, L_k . При использовании L_5 , равной по величине индуктивности "земли" или провода при частоте 150 кГц, погрешность моделирования не хуже 10% (рис.2.):

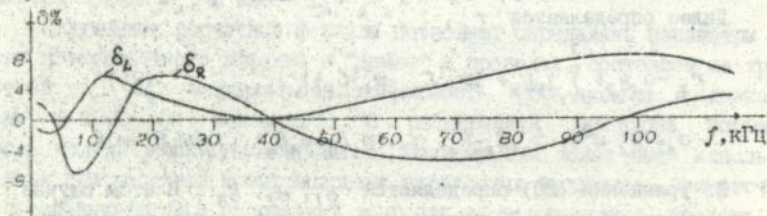


Рис.2

Параметры модели для линии электропередачи 110кВ, транспонированной с горизонтальной подвеской проводов при стандартных расстояниях между проводами и средней высотой подвеса, представлены в таблице 1.

№	Исходные параметры				Параметры модели				
	$f, \text{Гц}$	$r_{oc}, \text{Ом/км}$	$L_{oc} 10^{-2}, \text{Гн/км}$	$r_{вз}, \text{Ом/км}$	$L_{вз} 10^{-2}, \text{Гн/км}$	$r_{сб}, \text{Ом/км}$	$10^{-2} L_{сб}, \text{Гн/км}$	$r_{вз}, \text{Ом/км}$	$10^{-2} L_{вз}, \text{Гн/км}$
1.	50	0	0,33	0	0,25	0	0,21	0	0,18
2.	100	0,263	0,079	0,096	0,073	0,397	0,128	0,354	0,111
3.	800	0,981	0,053	0,734	0,053	26,66	0,043	22,65	0,041
4.	3000	3,035	0	2,593	0	6,769	0	2,852	0
5.	200000	0	0,024	0	0,022	0	0,011	0	0,009

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОНЫ НА ПРОВОДАХ [36,39,41,52].

Для моделирования короны за основу принята физическая модель ЛПТ с параллельными ветвями r_k, C_k (рис.3). Число параллельных ветвей выбирается из условия равенства проводимостей модели короны и величинной ветви $\Delta C, \Delta E$, параметры которой определяются по эмпирическим формулам, например, по (7).

В системе уравнений (2) ф-токи модели короны

$$\varphi = \begin{vmatrix} t_{кор1} \\ t_{кор2} \\ \vdots \\ t_{корn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{vmatrix} \quad (22)$$

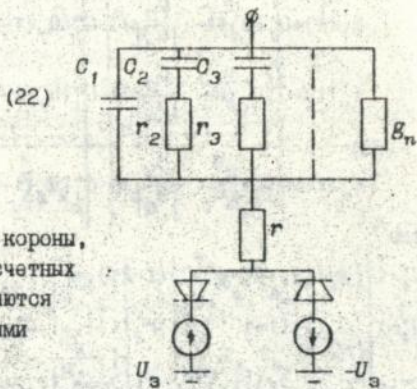


Рис. 3

При использовании модели короны, представленной на рис.3, в расчетных формулах (2) функции φ заменяются системой уравнений с нелинейными коэффициентами

$$\frac{d}{dt}(C_1 u_{o1}) = i_1,$$

$$\frac{d}{dt}(C_2 u_{o2}) = \frac{d}{dt}(C_2 u_{o1} - C_2 r_2 i_2) = i_2,$$

$$\frac{d}{dt}(C_{n-1} u_{o_{n-1}}) = \frac{d}{dt}(C_{n-1} u_{o1} - C_{n-1} r_{n-1} i_{n-1}) = i_{n-1},$$

$$g_n u_{o1} = i_n,$$

где i_1, i_2, \dots, i_n - токи в ветвях модели короны,
 $C_1, C_2, \dots, C_{n-1}, r_1, r_2, \dots, g_n$ - параметры модели короны,
 $u_{o1}, u_{o2}, \dots, u_{o_{n-1}}$ - напряжение на емкостях C_1, C_2, \dots

Эти выражения действительны и при коронировании провода, когда

$$|i_{кор}| = |i_1 + i_2 + \dots + i_n| > 0$$

и в межкоронной паузе, когда

$$i_{кор} = 0.$$

Коронирование начинается с момента, когда напряжение на проводе и модели по абсолютной величине станет больше напряжения зажигания короны $|u_d(t)| + |u_o(t)| \geq U_a$, (U_a - напряжение зажигания короны) Коронирование прекращается с момента, когда ток короны подойдет к нулевому значению.

Для осуществления расчетов по формулам (23) дифференциальные выражения заменяются соответствующими разностями.

Записав в разностной форме после преобразования получим

(23)

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= G_1' [u_d (1 - \frac{U_3}{|u_d|})] - G_1'' (u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|})) - \chi_1 i_1(t-2\tau) + O(\tau^2), \\
 i_2(t) &= G_2' [u_d (1 - \frac{U_3}{|u_d|})] - G_2'' (u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|})) - \chi_2 i_2(t-2\tau) + O(\tau^2), \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$i_n(t) = G_n' [u_d (1 - \frac{U_3}{|u_d|})] - G_n'' (u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|})) - \chi_n i_n(t-2\tau) + O(\tau^2),$$

где

$$G_1' = \tau^{-1} C_1(t), \quad G_1'' = \tau^{-1} C_1(t-2\tau),$$

$$G_i' = \tau^{-1} C_2(t) [1 + \tau^{-1} C_2(t) r_2(t)], \dots, G_{n-1}' = \tau^{-1} C_n(t) [1 + \tau^{-1} C_n(t) r_n(t)],$$

$$G_2'' = \tau^{-1} C_2(t-2\tau) [1 + \tau^{-1} C_2(t-2\tau) r_2(t-2\tau)],$$

$$G_{n-1}'' = \tau^{-1} C_n(t-2\tau) [1 + \tau^{-1} C_n(t-2\tau) r_n(t-2\tau)],$$

$$\chi_i = \chi_n = 1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_{n-1} = [1 - \tau^{-1} C_2(t-2\tau) r_2(t-2\tau)] [1 + \tau^{-1} C_2(t-2\tau) r_2(t-2\tau)].$$

$$O(\tau^2) = C_m(t) \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\tau^{2\nu}}{(2\nu+1)!} \frac{d^{2\nu+1} u_i}{dt^{2\nu+1}} - C_m(t) r_m(t) \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\tau^{2\nu}}{(2\nu+1)!} \frac{d^{2\nu+1} u_i}{dt^{2\nu+1}}. \quad (25)$$

Здесь $u_d = u(t)$, $u_f = u(t-2\tau)$ - напряжение на проводе в момент времени t и $t-2\tau$. В приведенных формулах выражении $u_i(t)$ заменено на разность.

$$u_{o_f}(t) = u_d - \frac{u_i}{|u_d|} U_3. \quad (26)$$

Ток короны модели равен

$$\begin{aligned}
 i_{кор}(t) &= \sum_{k=1}^n i_k(t) = u_d (1 - \frac{U_3}{|u_d|}) \sum_{k=1}^n G_k' - \\
 &- u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|}) \sum_{k=1}^n G_k'' - \sum_{k=1}^n \chi_k i_k(t-2\tau) + O(\tau^2).
 \end{aligned} \quad (27)$$

Таким образом, получено выражение для тока короны при коронировании провода ЛЭП с остаточным членом $O(\tau^2)$.

Для многопроводной линии выражения (27) выглядит следующим образом:

$$\begin{vmatrix} t_{кор1} \\ t_{кор2} \\ \vdots \\ t_{корm} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{k=1}^n G'_{k1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^n G'_{k2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{k=1}^n G'_{km} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_{d1} (1 - \frac{U_3}{|u_{d1}|}) \\ u_{d2} (1 - \frac{U_3}{|u_{d2}|}) \\ \dots \\ u_{dm} (1 - \frac{U_3}{|u_{dm}|}) \end{vmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{vmatrix} \sum_{k=1}^n G''_{k1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^n G''_{k2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{k=1}^n G''_{km} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_{f1} (1 - \frac{U_3}{|u_{f1}|}) \\ u_{f2} (1 - \frac{U_3}{|u_{f2}|}) \\ \dots \\ u_{fm} (1 - \frac{U_3}{|u_{fm}|}) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{k=1}^n \chi_{k1} t_{k1} (t-2\tau) \\ \sum_{k=1}^n \chi_{k1} t_{k2} (t-2\tau) \\ \dots \\ \sum_{k=1}^n \chi_{km} t_{km} (t-2\tau) \end{vmatrix}$$

После погасания короны (ток короны подходит к нулевому значению), конденсаторы модели разряжаются и расчет напряжений на конденсаторах ведется по другим формулам с учетом того, что $t_{кор} = 0$.

$$\begin{aligned} u_{o1}(t) &= (G'_1 - \sum_{k=2}^n G'_k)^{-1} [(G'_1 - \sum_{k=2}^n G''_{k1}) u_{o1}(t-2\tau) - \\ &- \sum_{k=2}^{n-1} G''_{k1} r_k(t-2\tau) t_k(t-2\tau)], \end{aligned} \quad (29)$$

$$u_{o2}(t) = [1 - r_2(t) G'_2] u_{o1}(t) + r_2(t) G''_2 u_{o2}(t-2\tau),$$

$$u_{o_{n-1}}(t) = [1 - r_{n-1}(t) G'_{n-1}] u_{o1}(t) + r_{n-1}(t) G''_{n-1} u_{o_{n-1}}(t-2\tau).$$

Разностные выражения (28) и (29) представляют искомую математическую модель.

Параметры модели зависят от мгновенного значения напряжения. Для их определения на каждом шаге расчета используется сплайн-интерполяция. Для использования модели предварительно необходимо получить информацию для осуществления сплайн-интерполяции.

5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ КОРОНЫ [42, 47].

Для сплайн-интерполяции необходимо знать значения параметров модели короны при конкретных фиксированных значениях перенапряжений. Для этих значений перенапряжений параметры могут быть найдены решением системы уравнений

$$jw_1 C_1 + \sum_{k=2}^{n-1} \left(r_k + \frac{1}{jw_1 C_k} \right)^{-1} + g_n = \Delta g(w_1) + jw_1 \Delta C(w_1), \quad (30)$$

$$i=1, 2, \dots, n-1.$$

Система составлена из условия равенства проводимости ветвей модели и нелинейной ветви Δg , ΔC по (7) для заданного значения перенапряжений.

Для вычисления параметров модели из четырех ветвей, первая из которых только емкостная, а последняя резистивная, получен ниже следующий алгоритм.

Сначала определяются дополнительные переменные Y_1, Y_2, Y_3 решением матричного уравнения аналогичного (19)

$$|A| |Y| = |F|, \quad (31)$$

в котором элементы матрицы A и F вычисляются из выражений:

$$\alpha_{11} = \sum_{k=1}^2 \sigma_k^{-1} \sum_{v=1}^2 \gamma_v [\Delta C(w_v) - \Delta C(w_{v+1})],$$

$$\alpha_{21} = \sum_{v=1}^2 \eta_v [w_{v+1}^{-2} \Delta g(w_{v+1}) - w_v^{-2} \Delta g(w_v)],$$

$$\alpha_{31} = (\eta_1 - \eta_3) w_2^{-2} \Delta g(w_2) - \eta_1 w_1^{-2} \Delta g(w_1) + \eta_3 w_4^{-2} \Delta g(w_4),$$

$$\alpha_{12} = \sum_{k=1}^2 \sigma_k^{-1} \sum_{v=1}^2 \gamma_v [\Delta g(w_v) - \Delta g(w_{v+1})],$$

$$\alpha_{22} = \sum_{v=1}^2 \eta_v [\Delta C(w_v) - \Delta C(w_{v+1})],$$

$$\alpha_{13} = \sum_{k=1}^2 \sigma_k^{-1} \sum_{v=1}^2 \gamma_v [w_{v+1}^2 \Delta C(w_{v+1}) - w_v^2 \Delta C(w_v)],$$

$$\alpha_{23} = (\eta_3 - \eta_1) \Delta C(w_2) + \eta_1 \Delta C(w_1) - \eta_3 \Delta C(w_4),$$

$$\alpha_{32} = \sum_{v=1}^2 \eta_v [\Delta g(w_v) - \Delta g(w_{v+1})],$$

$$a_{33} = (\eta_3 - \eta_1) \Delta g(w_2) + \eta_1 \Delta g(w_1) - \eta_3 \Delta g(w_4),$$

$$f_1 = \sum_{k=1}^2 \sigma_k^{-1} \sum_{\nu=1}^2 \gamma_{\nu} (w_{\nu}^{-2} \Delta g(w_{\nu}) - w_{\nu+1}^2 \Delta g(w_{\nu+1})),$$

$$f_2 = \sum_{\nu=1}^2 \eta_1 (w_{\nu}^{-2} \Delta C(w_{\nu}) - w_{\nu+1}^2 \Delta C(w_{\nu+1})),$$

$$f_3 = (\eta_3 - \eta_1) w_2^{-2} \Delta C(w_2) + \eta_1 w_1^{-2} \Delta C(w_1) - \eta_3 w_4^{-2} \Delta C(w_4).$$

Здесь

$$y_1 = x_2 + x_3 + x_4, \quad y_2 = x_2 x_3 + x_2 x_4 + x_3 x_4, \quad y_3 = x_2 x_3 x_4,$$

$$r_2 c_2 = x_2, \quad r_3 c_3 = x_3, \quad r_4 c_4 = x_4, \quad \gamma_1 = (w_2^2 - w_1^2)^{-1},$$

$$\gamma_2 = (w_2^2 - w_3^2), \quad \gamma_3 = (w_2^2 - w_4^2), \quad \sigma_1 = -(w_1 w_2)^{-2} + (w_2 w_3)^{-2}, \quad \sigma_2 = (w_2 w_4)^{-2} - (w_1 w_2)^{-2}.$$

После вычисления y_1, y_2, y_3 определяются x_2, x_3, x_4 из решения кубического уравнения $x^3 - y_1 x^2 + y_2 x - y_3 = 0$.

Затем вычисляются емкость C_1 и проводимость g_n

$$C_1 = y_3^{-1} \left(\sum_{\nu=1}^3 \gamma_{\nu} y_{\nu} - P_0 g_n \sigma_1 \right), \quad (32)$$

$$g_n = \sigma_1^{-1} \left\{ \sum_{\nu=1}^3 \beta_{\nu} y_{\nu} - \sum_{\nu=1}^2 \gamma_{\nu} (w_1^{-2} \Delta g(w_1) - w_2^{-2} \Delta g(w_2)) \right\}, \quad (33)$$

где

$$P_0 = w_1^{-2} \Delta g(w_1) - w_2^{-2} \Delta g(w_2), \quad P_1 = \Delta C(w_2) - \Delta C(w_1),$$

$$P_2 = \Delta g(w_1) - \Delta g(w_2), \quad P_3 = w_1^2 \Delta C(w_1) - w_2^2 \Delta C(w_2),$$

$$\sigma_3 = (w_1 w_2)^{-2}, \quad \beta_1 = \sum_{\nu=1}^2 \gamma_{\nu} [\Delta C(w_{\nu}) - \Delta C(w_{\nu+1})],$$

$$\beta_2 = \sum_{\nu=1}^2 \gamma_{\nu} [\Delta g(w_{\nu}) - \Delta g(w_{\nu+1})], \quad \beta_3 = - \sum_{\nu=1}^2 \gamma_{\nu} (w_{\nu}^2 \Delta C(w_{\nu}) - w_{\nu+1}^2 \Delta C(w_{\nu+1})).$$

Далее определяются параметры C_2, C_3, C_4 и r_2, r_3, r_4 решением матричного уравнения

$$\|D\| \|C\| = \|P\|, \quad (34)$$

где

$$d_{i,j} = (1 + w_i^2 x_{j+1}), \quad i, j = 1, 2, 3$$

$$p_i = \Delta C(w_i) - C_i.$$

Затем определяются r_2, r_3, r_4 решением другого матричного уравнения

$$|B| |r| = |E|, \quad (35)$$

где

$$b_{ij} = w_i^2 x_{j+1}^2 (1 + w_i^2 x_{j+1}), \quad i, j = 1, 2, 3,$$

$$b_{ii} = \Delta g(w_i) - r_{i+1}^{-1}.$$

В таблице 2 представлены параметры модели короны для трех значений перенапряжений (для сплайн-интерполяции используется не менее 20).

Таблица 2

Пар.	Ед. изм.	U/U_3		
		1,2	1,4	2
C_1	Пф км	-168,4	-23,9	84,8
C_2		382,1	780,5	150,1
C_3		249,1	484,1	700,8
C_4		-201,4	-418,3	-439,1
r_2	Мом. км	2,33	1,02	0,7
r_3		0,155	0,1647	0,142
r_4		2,45	1,095	0,788
g_n	$\frac{1}{\text{Мом}}$	0,135	0,418	0,614

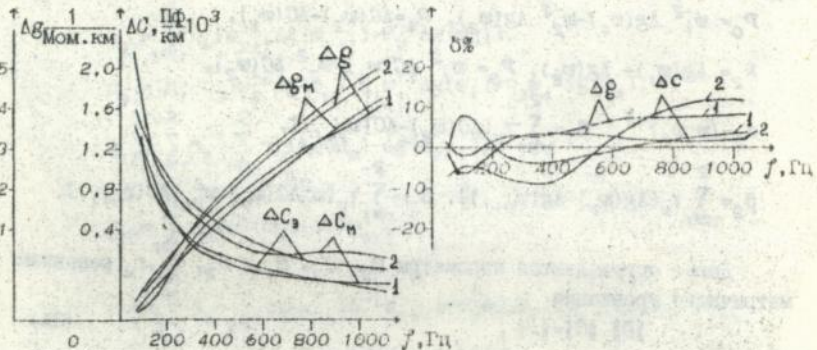


Рис. 4.

а)

б)

Зависимость Δg_M и ΔC_M модели от частоты в диапазоне 50-2000 Гц и погрешность моделирования, представлены на рис. 4. Здесь индексы "Э", "М" обозначают эмпири-

ческие значения и модельные, вычисленные по (31)-(35). Кривые величин и погрешностей $\Delta g, \Delta C$ получены: 1-при $u/U_3=1,18$; 2-при $u/U_3=3$. Как видно, модель в рассматриваемом диапазоне обладает незначительной погрешностью в пределах 1,1 до $3U_{\text{ф}}$

Таким образом модель короны из четырех ветвей при ее использовании может дать достоверные результаты.

6. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И КОРОНЫ [6,18-35,48,49]

Подстановка математических моделей учета поверхностного эффекта и короны в расчетные разностные уравнения многопроводной линии электропередачи дает

$$\begin{aligned}
 & (1+hZ \sum_{k=1}^n G'_k) u_d + (Z+Z_s) i_d = u_p + Z l_p + hZ \sum_{k=1}^n G'_k (\mp U_3) + \\
 & + hZ u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|}) \sum_{k=1}^n G''_k + hZ \sum_{k=1}^n \chi_k i_k + \sum_{k=1}^p Z_s \alpha_k i_{f_k}, \quad (36) \\
 & -(1+hZ \sum_{k=1}^n G'_k) u_d + (Z+Z_s) i_d = -u_q + Z l_q - hZ \sum_{k=1}^n G'_k (\mp U_3) - \\
 & - hZ u_f (1 - \frac{U_3}{|u_f|}) \sum_{k=1}^n G''_k - hZ \sum_{k=1}^n \chi_k i_k + \sum_{k=1}^p Z_s \alpha_k i_{f_k}.
 \end{aligned}$$

Здесь точки d, p, q, f имеют координаты $(x, t), (x-h, t-\tau), (x+h, t-\tau)$ и $(x, t-2\tau)$ (рис.5).

Приведенные выражения позволяют вычислить значение напряжений и токов u_d, i_d на шаге x, t по известным значениям напряжений и токов $u_p, u_q, i_p, i_q, u_f, i_f$ линии электропередачи и токов и напряжений моделей поверхностного эффекта и короны i_{f_k}, u_{c_k} где $k=1,2,3,4$ - номер ветвей короны и

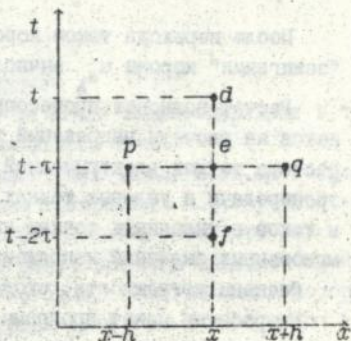


Рис.5

поверхностного эффекта.

После вычисления значений u_d, t_d , должны быть вычислены новые значения токов и напряжений в моделях поверхностного эффекта и короны по следующим формулам:

$$\begin{aligned} t_1(t+2\tau) &= Z_{a_1}^{-1} u_{a_{1t}} + \alpha_1 t_1(t), \\ t_2(t+2\tau) &= Z_{a_2}^{-1} u_{a_{2t}} + \alpha_2 t_2(t), \\ t_p(t+2\tau) &= Z_{a_p}^{-1} u_{a_{pt}} + \alpha_p t_p(t), \\ u_{o_1}(t+2\tau) &= u_{d_1} \left(1 - \frac{U_3}{|u_{d_1}|} \right), \end{aligned} \quad (37)$$

$$u_{o_{n-1}}(t+2\tau) = u_{o_1}(t+2\tau) - r_{n-1}(t+2\tau) t_{n-1}(t+2\tau),$$

где

$$u_{o_{1t}} = Z_{a_{1t}} t_{d_1} - \sum_{k=1}^p Z_{a_{1t}} \alpha_{k_1} t_{f_k}(t), \quad (38)$$

После перехода током короны нулевого значения и до следующего "зажигания" короны u_{o_k} вычисляются по формулам (29).

Расчет волновых процессов в сложной электрической сети расчленяется на расчеты напряжений и токов в равноотстоящих на величину шага расчета точках электрической сети - промежуточных точках линий электропередачи и узловых точках сети. Последовательный расчет напряжений и токов в указанных точках на одном шаге по времени дает картину мгновенных значений напряжений и токов во всей сети.

Оценены погрешность, сходимость и устойчивость расчетов по (36).

Разработан пакет программы расчета волновых процессов в сложных электрических цепях с распределенными параметрами с учетом диссипативных факторов для теоретической апробации новых технических решений.

7. РЕШЕНИЕ АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (2,4,5,8-11,13-17,19-28,30-34,37,38,44-46,50,51)

7.1. Ограничение восстанавливающихся напряжений (ВН) в условиях ограничения токов однофазных коротких замыканий.

Ограничение токов несимметричных к.з. на "землю" повышением сопротивления нулевой последовательности X_0 приводит, как известно, к возрастанию амплитуды и скорости ВН. Поскольку ограничение токов к.з. выполняется либо частичным разземлением нейтрали, либо включением в нейтраль индуктивности и т.д., изоляция нейтрали должна быть защищена резисторами. Наличие в нейтрали резисторов способствует затуханию свободных составляющих напряжений и токов и, очевидно, влияет на ВН.

Влияние резисторов в цепи нейтрали на ВН при ликвидации к.з. рассматривалось на схеме рис.6.

Результаты расчетов показали возможность ограничения ВН с помощью резисторов в нейтрали, включаемых параллельно или последовательно с токоограничивающими реакторами. Ниже приводятся результаты расчетов для конкретных значений параметров. Параметры схемы таковы, что ток однофазного к.з. непосредственно за выключателем при напряжении 115кВ равен 25кА, а однофазного к.з. при глухом заземлении нейтрали - 30кА.

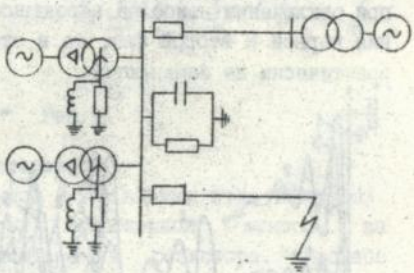


Рис.6

Короткое замыкание рассматривается непосредственно за выключателем и на линии электропередачи в точке, где ток к.з. составляет 75% максимального тока.

Рассматривались варианты: до ограничения токов к.з., при ограничении тока однофазного к.з. до 60% тока трехфазного к.з. резистором, включенным параллельно реактору, с сопротивлением резистора вдвое большим сопротивления реактора, при ограничении тока однофазного к.з. до 60% тока трехфазного к.з. и резистором, сопротивление которого равно сопротивлению реактора, при ограничении тока однофазного к.з. без использования резисторов.

Результаты расчета ВН при отключении трехфазного к.з. за выключателем представлены на рис.7, а на удалении при к.з. в точке наиболее

опасного к.з.-на рис.8.Группа кривых а,б,в-соответствует ВН между контактами выключателей первой, второй и третьей отключаемых фаз линии с трехфазным к.з.Каждая группа содержит четыре кривые, соответственно рассматриваемым вариантам: 1 - до ограничения, 2 и 3 - при включении в нейтрали резисторов параллельно реакторам, 3 - сопротивление резисторов на два порядка больше сопротивления реакторов (50Гц),2- сопротивление резисторов в 2 раза больше сопротивления реакторов.

При глухом заземлении нейтрали, т.е. до ограничения токов к.з. наиболее тяжелым при отключении к.з. непосредственно за выключателем является отключение последней фазы, поскольку только в этом случае восстанавливается номинальное напряжение. При отключении неудаленного трехфазного к.з. одинаково тяжелым является отключение всех трех фаз.

Ограничение токов к.з. в наиболее тяжелом случае отключения неудаленного к.з. облегчается повышением сопротивления нулевой последовательности X_0 . Облегчаются условия работы выключателя при отключении третьей фазы трехфазного к.з.т.е.облегчается работа выключателя по ВН при отключении наиболее вероятных однофазных к.з.Что касается отключения первой и второй фаз, то в этом случае условия работы выключателя практически не изменяются.

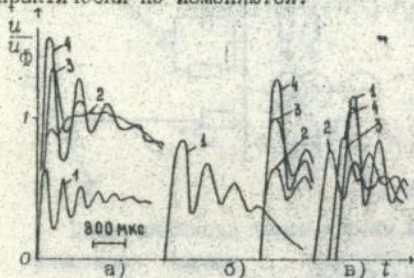


Рис.7

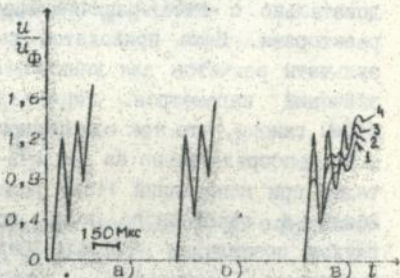


Рис.8

При отключении к.з. резистор между контактами выключателя оказывает существенное влияние на ВН, облегчая ликвидацию к.з.Степень воздействия резистора на ВН зависит от его сопротивления и нелинейности.

После отключения к.з. резистор остается под напряжением до срабатывания отделителя.В этот период, когда его основное назначение уже выполнено, он подвергается основным термическим воздействиям и расходует свой ресурс пропускной способности.В связи с повышением сопротивления нулевой последовательности для ограничения токов к.з. изменяется и напряжение, воздействующее на резистор между контактами

выключателей при отключении к.з. Для оценки приемлемости токоограничивающих мероприятий необходима оценка этих напряжений и их изменение при увеличении X_0 . Для решения вопроса о величине воздействующих на резистор напряжений были выполнены соответствующие расчеты.

7.2. Насыщающийся реактор в цепи короткого замыкания.

Наиболее существенным параметром с точки зрения процесса восстановления электрической прочности непосредственно за нулем тока является скорость подхода к нулю, при этом существенное значение имеет реальная форма тока и напряжения в непосредственной близости подхода тока к нулю. Выключение параллельно выключателю емкостных и резистивных элементов деформирует кривую тока при подходе его к нулю, вызывая некоторую задержку нарастания ВП, облегчая при этом работу выключателя.

Влияние деформации кривой тока вблизи нуля на отключающую способность выключателей до недавнего времени не исследовалось.

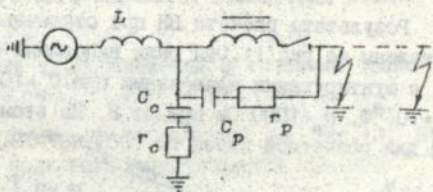


Рис.9

Для осуществления деформации кривой тока вблизи нуля нами был использован насыщающийся реактор, снабженный шунтом из последовательно соединенных конденсатора и резистора. Процесс рассматривается как при наличии, так и в отсутствии шунта. Расчетная схема представлена на рис.9.

Расчеты были выполнены для номинального напряжения реактора, составляющего 1; 0,5; 0,25% рабочего напряжения выключателя. Результат расчета подхода тока к.з. к нулю в цепи с $U_p = 0,25U_B$ представлен на рис.10. Кривая 1 получена при отсутствии реактора и к.з. непосредственно за выключателем, кривая 5 - в точке на линии, в которой ток к.з. составляет 75% максимального. Кривые 2 и 6 получены в отсутствие шунтирующих элементов на реакторе, кривые 3 и 7 с шунтирующими элементами при $C_p = 10^{-8} \text{ ф}$, $r_p = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}$, кривые 4 и 8 с шунтирующими элементами при $C_p = 10^{-7} \text{ ф}$, $r_p = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.

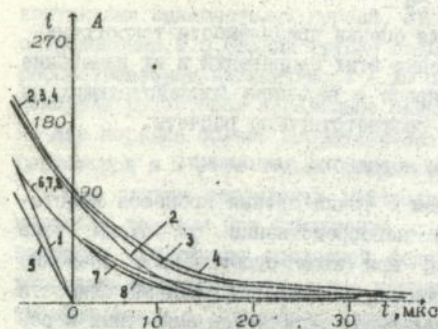


Рис. 10

Результаты расчета ВН при отключении к.з. за выключателем представлены на рис. 11. Они были выполнены без шунтирующих элементов — кривая 1, с шунтирующими элементами при $C_p = 10^{-9} \text{ Ф}$, $r_p = 3500 \text{ Ом}$ — кривая 2 и $C_p = 10^{-8} \text{ Ф}$, $r_p = 1000 \text{ Ом}$ — кривая 3. На этом же рисунке представлена кривая ВН для расчетной схемы по ГОСТ 657-73.

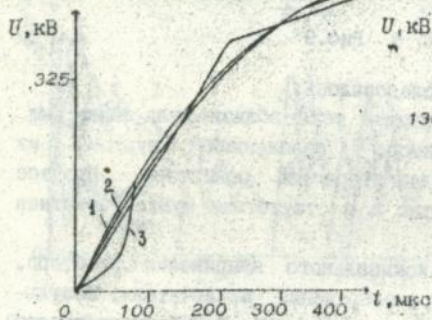


Рис. 11

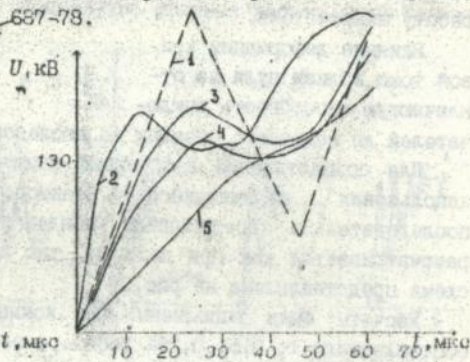


Рис. 12

Как видно при отсутствии шунтирующих элементов ВН на выключателе в дуговом промежутке в цепи с насыщающимся реактором несколько хуже, чем на выключателе в цепи без реактора. Но это ухудшение ВН не соизмеримо с положительным эффектом, вызванным уменьшением $\frac{di}{dt}$ в области нуля тока.

Результаты расчета ВН при отключении неудаленного к.з. с током к.з. 75% от максимального тока представлены на рис. 12. На рисунке

Результаты расчета показали, что при наличии насыщающегося реактора отключающая способность выключателя может быть значительно увеличена.

Эффективность реакторов с номинальным напряжением в 0,5% рабочего напряжения выключателя соответственно выше, т.к. пропорционально увеличивается время существования малой $\frac{di}{dt}$.

представлены: ВН, нормируемое ГОСТ 617-78-кривая 1; ВН при отключении не удаленного к.з. без шунтирующих элементов реактора - кривая 2; ВН при отключении не удаленного к.з. при наличии шунтирующих элементов r_p, C_p у реактора - кривая 3 ($r_p = 10^4 \text{ Ом}$, $C_p = 10^{-9} \text{ Ф}$), - кривая 4 ($r_p = 9 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $C_p = 10^{-9} \text{ Ф}$), - кривая 5 ($r_p = 10^2 \text{ Ом}$, $C_p = 10^{-7} \text{ Ф}$).

Расчет показал, что применение насыщающегося реактора без шунтирующих элементов нецелесообразно. Учитывая, что современная промышленность позволяет реализовать вариант хода ВН, представленный кривой 3, можно считать перспективным решение проблемы отключения токов к.з. с помощью насыщающихся реакторов.

Вид расчетных ВН, отличный от пилообразного, объясняется недозарядом линии до прохождения током нулевого значения, вследствие повышения сопротивления реакторов.

7.3. Предотвращение и подавление феррорезонанса с силовыми трансформаторами на отпайках.

Исследование проводилось по схеме представленной на рис.13. В конце неполнофазно питаемой линии подключен ненагруженный трансформатор, снабженный короткозамыкателем и отделителем. Рассматривалось влияние на развитие феррорезонанса резистора в нейтрали, вентильного разрядника и включение короткозамыкателя. Типичная картина развития феррорезонанса показана на рис.14. В результате расчетов было установлено, что заземления нейтрали через резистор способно исключить возможность возникновения феррорезонансных перенапряжений, вентильный же разрядник подавить феррорезонанс не способен и при феррорезонансе будет разрушен. Подавить феррорезонанс можно включением короткозамыкателя. Это предложение и было принято для реализации, что потребовало разработки специального

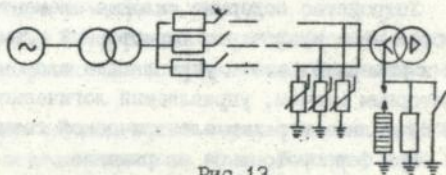


Рис.13

разрушен. Подавить феррорезонанс можно включением короткозамыкателя. Это предложение и было принято для реализации, что потребовало разработки специального

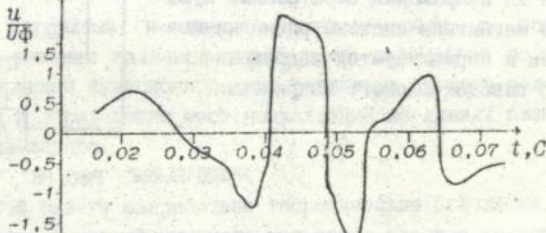


Рис.14

прибора для выявления и подавления феррорезонанса.

7.4. Подавление феррорезонанса трансформатора напряжения

Типичная картина феррорезонанса трансформатора напряжения (ТН) представлена на рис.15. Для подавления феррорезонанса были предложены и проанализированы различные устройства. Для реализации было отобрано устройство, в котором при феррорезонансе ТН на его обмотку низшего напряжения от источника собственных нужд через специальный дополнительный трансформатор связи (ТС) подается нормализующее его работу синусоидальное напряжение - рис.16.

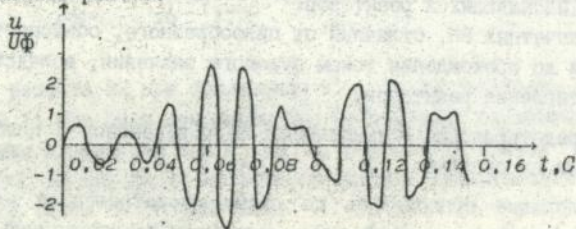


рис.15

Устройство содержит силовые элементы и связи цепи с источником собственных нужд через тиристорный ключ с целью низшего напряжения ТН и измерительные и управляющие элементы и цепи: блок управления тиристорным ключом, управляемый логической схемой от блока, определяющего состояние и режим электрической сети.

При феррорезонансе напряжение на ТН изменяется по фазе на 180° и содержит комплекс нечетных гармоник, магнитная система ТН перенасыщается. Подачей на сторону низшего напряжения ТН напряжения собственных нужд его магнитная система размагничивается и нормализуется напряжение на его выводах высшего напряжения.

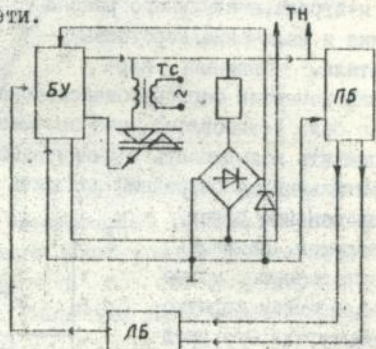


Рис.16

7.5. Предотвращение феррорезонанса на преобразовательной подстанции

Электрическая схема на преобразовательной подстанции представлена рис.17. Для этой схемы был выполнен расчет включения под напряжение трансформаторов 3х135 кВ с фильтрами 35 кВ и фильтров 35 кВ.

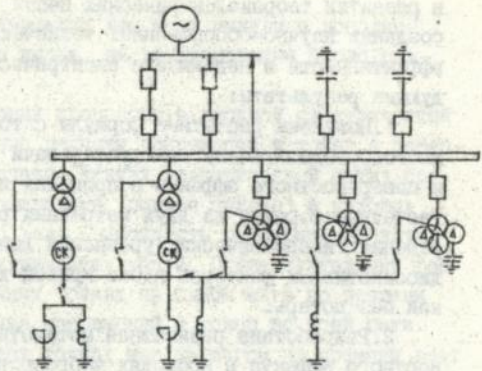


Рис.17

Необходимость в указанных коммутациях возникает при первом включении вставки (преобразовательная п/ст) в работу, при вводе трансформаторов и фильтров в работу после ремонта, а также при восстановлении работы вставки после отключения линии электропередачи, связывающий вставку с потребителем или источником, когда одна из цепей 400 или 300 кВ находится в ремонте.

Для исключения возникновения феррорезонанса потребовалось частичное заземление нейтрали через резисторы и применение балластной нагрузки на стороне 35кВ.

Нами выполнен расчет и для случая, когда перед сбросом нагрузки на стороне 70 кВ напряжение подсаживается до нуля. В этом случае после сброса на линиях вставки наблюдается переходной феррорезонанс, аналогичный переходному феррорезонансу при включении ОРУ вставки выключателем высшего напряжения. В этом случае при ликвидации к.з. необходимо использовать средства по предотвращению переходного феррорезонанса.

Разработанные алгоритмы и пакет программ были с успехом использованы и при решении задач по определению параметров волновых процессов, выборе уровней функционирования различных средств релейной защиты и автоматики и определении мест повреждений на линиях электропередачи без участия автора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны теоретические исследования, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение.

в развитии теории электрических цепей с диссипативными факторами и создании научно-обоснованных технических решений в области повышения эффективности и надежности электрических сетей. При этом получены следующие результаты:

1. Получены расчетные формулы с точностью до $O(h^2)$ для уравнений многопроводной линии электропередачи с учетом коронирования проводов и поверхностного эффекта в проводах и "земле" как в обратном проводе. Расчетные формулы из двух матричных разностных формул представляют решение гиперболических уравнений линии электропередачи с учетом диссипативных факторов вдоль кривой характеристического уравнения линии без потерь.

2. Разработана разностная математическая модель для учета поверхностного эффекта в проводах многопроводной линии электропередачи и "земле" на основе аппроксимации частотных характеристик проводов и "земли" системой разностных уравнений с постоянными коэффициентами r_k, L_k , позволяющая вычислить постоянные коэффициенты каждого уравнения независимо. Показано, что для моделирования поверхностного эффекта из параллельных ветвей r_k, L_k необходимо минимум три ветви при расчетах коммутационных переходных процессов и четыре ветви при расчете восстанавливающихся напряжений. При этом отклонение частотной характеристики модели от моделируемой не превышает 10%.

3. Разработан аналитический метод расчета параметров модели поверхностного эффекта из трех и четырех ветвей r_k, L_k , в последнем случае первая ветвь только индуктивная. Точность моделирования повышается дополнением ее пятой резистивной ветвью, неувеличивающей числа разностных уравнений модели.

4. Разработан метод аппроксимации частотных и нелинейных характеристик явления короны на проводах системой разностных уравнений с нелинейными коэффициентами r_k, C_k на основе физической модели, состоящей из параллельных ветвей r_k, C_k , логических ключей и источников поддерживающего напряжения. Для определения мгновенных значений параметров модели короны использована сплайн-интерполяция. Показано, что для моделирования частотных характеристик короны, отличающихся от заданных не более чем на 10% в области частот до 2 кГц, число ветвей модели должно быть не менее четырех.

5. Разработан аналитический метод расчета параметров модели короны для конкретных значений перенапряжений, служащих опорными точками для построения сплайн-интерполяции. Для повышения точности моделирования

введены последовательное сопротивление для всей модели и дополнительная параллельная резистивная ветвь, не увеличивающие число разностных уравнений модели.

6. Показано, что расчет волновых процессов в сложной электрической сети расчленяется на элементарные расчеты напряжений и токов в равноотстоящих (на величину шага расчета) точках электрической сети: промежуточных точках линии электропередачи (первая задача) и узловых точках сети (вторая задача). Это дает возможность расширить область моделирования многоузловых электрических цепей. Последовательный расчет напряжений и токов в указанных точках на одном шаге по времени дает картину мгновенного значения напряжений и токов во всей сети. Расчет напряжений и токов во всех точках шаг за шагом по времени дает картину изменений напряжений и токов.

7. Для решения ряда актуальных задач электроэнергетики сформулированы граничные условия, учитывающие нелинейные характеристики силовых и измерительных трансформаторов, ограничителей перенапряжений, вентильных разрядников, нелинейных резисторов, шунтирующих контакты выключателей и устанавливаемых в нейтрали трансформаторов. Разработана методика ускорения расчетов восстанавливающихся напряжений в сложных электрических сетях без потери точности, заключающаяся в уменьшении шага расчета напряжений и токов в узловой точке с коммутационным аппаратом и отключаемом отрезке линии.

8. Выполнен комплекс исследований восстанавливающихся напряжений между контактами выключателей в электрических сетях при изменении коэффициента заземления от 0,5 до 0,8 при наличии и отсутствии шунтирующих резисторов и резисторов в нейтрали, частичном заземлении нейтрали и заземлении нейтрали через реакторы, в том числе насыщаемых. Показана перспективность заземления нейтрали через нелинейные сопротивления. Эти результаты были использованы при разработках "Руководящих указаний по ограничению токов однофазных коротких замыканий в электрических сетях 110-220кВ энергосистем".

9. Выполнен комплекс исследований феррорезонансных явлений, способов и устройств их предотвращения и подавления с измерительными и силовыми трансформаторами, в т.ч. с преобразовательными, позволивший разработать необходимые технические средства. Эти результаты вошли в соответствующие нормативные документы Минэнерго СССР.

10. Разработаны на основе изобретений устройства для ограничения токов асимметричных коротких замыканий на "землю", восстанавливающихся напряжений, подавления и предотвращения феррорезонансных пере-

напряжений подготовлено их производство по заказу Росэнерго на НПО "Преобразователь" г.Запорожье и НПО "Клестий", г.Баку.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Джуварлы Ч.М., Джаферов Э.М., Гашимов А.М. Оценка погрешности при расчетах частотных характеристик и импеданса ЛЭП с учетом сопротивлений земли //ЭТП, -1973. -№10, -с.17-19.

2. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М. Численные расчеты восстанавливаемых напряжений с учетом влияющих нелинейных элементов сети //Сб. науч. трудов Таш.ИИ: Теория нелинейных электрических цепей и систем/-Ташкент, 1975-вып.2. -с.164-165.

3. Дмитриев Е.В., Гашимов А.М. Численное моделирование поверхностного эффекта в проводах и земле при расчетах восстанавливаемых напряжений //сб. науч. трудов ИФАН Аз.Респ.: Частичное заземление нейтрали в электрических системах через резистор/-Баку, Элм, 1976, -с.69-79.

4. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М. Исследование влияния параметров сети и заземляющей резисторной установки на амплитуду и скорость восстанавливаемых напряжений при ликвидации коротких замыканий. //Там же с.99-114.

5. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Ибрагимов Т.А. Численные расчеты электромагнитных процессов при неполнофазном включении линии электропередач с ненагруженным трансформатором. //Там же -с.191-206.

6. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Джаферов Э.М., Гашимов А.М. Численный расчет напряжений на контактах выключателей при отключении удаленных коротких замыканий //Ж.ЭТП-1976-№с-с.26-30.

7. Гашимов А.М. Исследование погрешности модели для учета поверхностного эффекта в "земле" //сб. науч. трудов ИФАН Аз.Респуб.: Частичное заземление нейтрали в электрических системах через резистор /-Баку, Элм, 1976, -с.80-84.

8. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Григорьевичи О.Е. Анализ напряжений воздействующих на нелинейный резистор между дугогасительными контактами выключателя //ж.ЭТП, -1976-№ 3-с.25-31.

9. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Григорьевичи О.Е. Напряжения, воздействующие на резистор шунтирующие дугогасительные контакты выключателей при отключении коротких замыканий //Сб. науч. трудов ИФАН Аз.Респуб.: Частичное заземление нейтрали в электрических системах через резистор/-Баку, Элм, 1976-с.115-129.

10. Разработка мероприятия по ограничению токов к.з. на землю в

сетях 220кВ. Осуществление опытно-промышленной эксплуатации резисторных установок на ОРУ 110кВ Сумгаитской ТЭЦ. Отчет о НИР // ИФАН Азерб. Респуб. Инв. № Б691623-Баку, 1977-с. 43.

11. Разработка схемы заземления нейтрали трансформатора открытого распределительного устройства 400кВ вставки постоянного тока и исследование переходных процессов в ее элементах при коммутационных и грозовых воздействиях. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. инв. № Б763434-Баку, 1978-с. 56.

12. Разработка алгоритмов и пакета программ для расчета коммутационных процессов в электропередачах УВН. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. Инв. № 5831434-Баку, 1979-с. 34.

13. А.с. 725144. СССР, М. кл² Н02Н3/02. Устройство для ограничения тока короткого замыкания на высоковольтной подстанции / К. М. Антипов, А. М. Гашимов, В. П. Горелов, Ч. М. Джуварли, Е. В. Дмитриев - Опуб. 30.03.80, Бюл. № 12.

14. А.с. 878143. СССР, М. кл² Н02J3/00. Распределительное устройство высокого напряжения / А. Е. Врублевский, А. М. Гашимов, И. С. Давыдов, Ч. М. Джуварли, Е. В. Дмитриев, Н. Н. Тиходеев - 1981, Бюл. № 40.

15. Гашимов А. М., Давыдов И. С., Джуварли Ч. М., Дмитриев Е. В., Тиходеев Н. Н. Глубокое ограничение перенапряжений при коммутациях выключателями, оснащенными резисторами // Применение в электроэнергетике мощных бета-ловых резисторов и резисторных установок: (Теп. докл. Всесоюз. освещ.). - Новосибирск, 1980-с. 2-4.

16. Гашимов А. М., Джуварли Ч. М., Дмитриев Е. В., Магда И. И., Назаров А. И., Панасюк Д. Н. Защита конденсаторных батарей от бросков токов и напряжений при коммутациях включения и отключения // Там же с. 12-14.

17. А.с. 836264 СССР, М. Кл³ Н02J3/00. Электрическая станция / А. М. Гашимов, Ч. М. Джуварли, Е. В. Дмитриев и др. - Опубл. 07.12.81, Бюл. № 45

18. Математическое моделирование и исследования на ЦМ работы блока генератор-трансформатор по схеме звезда-звезда при различных нагрузках и коротких замыканиях. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. Инв. № 02.83.0027736. - Баку, 1981-с. 78.

19. А.с. 896643. СССР, М. Кл⁷. G06G7/62. Устройство для моделирования цепи нулевой последовательности автотрансформатора с заземленной нейтралью и третичной обмоткой, соединенной в треугольник / К. М. Антипов, А. М. Гашимов, Ч. М. Джуварли и др. - Опубл. 07.01.82, Бюл. № 1.

20. Разработка технических предложений и технико-экономических обоснований внедрения токоограничивающих устройств. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. Инв. № 0.2.83.0061742-Баку, 1982-с. 27.

21. А.с.1001836. СССР. М. Кл³. Н02J3/00. Высоковольтная подстанция / А.М. Гашимов, И.С. Давыдов, Ч.М. Джуварлы, Е.В. Дмитриев, Н.Н. Тиходеев - 1983, Бюл. № 22.
22. Антипов К.М., Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., и др. Испытания опытного блока генератор-трансформатор по схеме звезда-звезда Сумгайтской ТЭЦ №2 // Сб. науч. трудов ИФАН Аз.Респуб.: Ограничение токов коротких замыканий и сопутствующих перенапряжений / - Баку, Элм, 1983 - с. 71-88.
23. Гашимов А.М., Гялабов Г.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. Перенапряжения и защита от них при коммутациях на распределительном устройстве переменного тока вставки постоянного тока, коротких замыканий и их отключения. // Там же с. 116-140.
24. Гашимов А.М., Борисенко Л.С., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. и др. Предотвращение резонанса напряжений с трансформаторами напряжений 150-500 кВ // Там же с. 145-159.
25. Исследование токоограничивающих устройств в эксплуатации и разработке мероприятий по защите их от перенапряжений. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. инв. № 02.85.0014764 - Баку, 1983 - с. 82.
26. Внедрение токоограничивающих устройств и устройств ограничивающих перенапряжения. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. инв. № 02.85.0075411 - Баку, 1984 - с. 64.
27. Руководящие указания по ограничению токов однофазных коротких замыканий в электрических сетях 110-220 кВ энергосистем / К.М. Антипов, В.М. Максимов, В.Ф. Могузов, Ч.М. Джуварлы, Е.В. Дмитриев, А.М. Гашимов, Г.А. Дорф, Ю.Н. Львов, И.И. Магда // Москва, Советэнерго, - 1985 - с. 19.
28. Разработка теоретических основ заземления нейтрали электрических сетей с коэффициентом замыкания 0,8. Отчет о НИР / ИФАН Азерб. Респуб. инв. № 0286.0104813 - Баку, 1985 - с. 115.
29. Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В. К внедрению в научно-исследовательскую и проектную практику современных методов численного расчета волновых процессов. : (Тез. докл. Всесоюз. семинара) - Каунас, - КПИ, 1985 - том I - с. 23-25.
30. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Максимов В.М., Садыхов Б.М. Применению сплайн-интерполяции для моделирования ограничителей перенапряжений (ОПН) // ДАН Аз. Респуб. : - том XIII - 1986 - № 5 - с. 24-27.
31. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения / К.М. Антипов,

В.М.Максимов,С.С.Шур,Ч.М.Джуварлы,Е.В.Дмитриев,А.М.Гашимов,А.К.Щидловский, В.Г.Кузнецов,И.И.Магда//Москва,Союзтехэнерго,-1987-с.36.

32.Джуварлы Ч.М.,Гашимов А.М.Ограничение восстанавливающихся напряжений в условиях ограничения токов однофазных коротких замыканий //Токи короткого замыкания в электроэнергетических системах/III Международный симпозиум-Польша.-1988-том 3-с.230-239.

33.Создание средств ограничения квазистационарных перенапряжений и восстанавливающихся напряжений в условиях ограничения токов коротких замыканий.Отчет о НИР /ИФАН Азерб.Респуб. инв.№ 02.89.0034870-Баку, 1988-с.28.

34.Джуварлы Ч.М.,Дмитриев Е.В.,Бейбутов Р.А.,Гашимов А.М.,Бабаев Н.М. Восстанавливающиеся напряжения в компенсированных сетях при наличии в нейтрали резистора //ДАН Аз.Респуб.: -том ХLI-1988-№2.-с.31-33.

35.Джуварлы Ч.М.,Дмитриев Е.В.,Гашимов А.М.Разностные схемы для ускорения расчета восстанавливающихся напряжений //ДАН Аз.Респуб.: -том ХLIY-1988-№12.-с.28-32.

36.Опытно-промышленное освоение средств ограничения квазистационарных перенапряжений.Отчет о НИР /ИФАН Азерб.Респуб. инв. № 02.90.0018393 -Баку, 1989-с.70.

37.А.с.1473000.СССР,Кл.НО2Н9/02.Устройство для ограничения токов замыкания на корпус в судовой электроэнергетической системе/К.М.Антипов,Ч.М.Джуварлы,Е.В.Дмитриев,А.М.Гашимов и др.-Опубл.15.04.89.Бюл.№14.

38.А.с.1508915.СССР, Кл.НО2J3/00.Электрическая станция/К.М.Антипов,А.М.Гашимов и др.-1989,Бюл.№34.

39.Теоретические и экспериментальные исследования многофункциональных устройств для электрических сетей.Отчет о НИР /ИФАН Азерб. Респуб. инв.№ 02.91.0045275-Баку,1990-с.24.

40.Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В.Стандартные подпрограммы для расчета волновых процессов в многопроводных линиях электропередачи с учетом поверхностного эффекта в проводах и земле //Сб.науч. трудов ИФАН Аз.Респуб.:Численные эксперименты при исследованиях переходных и квазиустановившихся процессов в электрических сетях/-Баку, Элм,1991-с.5-37.

41.Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Садыхов Б.М.Расчетные формулы линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны//Там же-с.38-62.

42.Гашимов А.М., Лячугин В.Ф., Садыхов Б.М.Параметры модели короны //Там же-с.63-87.

43. Гашимов А.М. Моделирование поверхностного эффекта в земле и проводах для расчетов восстанавливающихся напряжений при отключении неудаленных коротких замыканий с погрешностью не более 10% // Там же - с. 116-125.

44. Гашимов А.М., Ибрагимов Т.А., Нурмамедов Т.А., Садыхов Б.М. Анализ квазиустановившихся режимов на линии с трансформатором на отпайках с учетом короны // Там же - с. 133-145.

45. Бейбутов Р.А., Гашимов А.М., Иванов Е.А. Реактор-фильтр нулевой последовательности // Там же - с. 155-159.

46. Бейбутов Р.А., Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М. Насыщаемый реактор в цепи короткого замыкания // Там же - с. 160-169.

47. Обобщение результатов работы, составление технических предложений для производства. Отчет о НИР /ИФАН Азерб. Респуб. инв. № 02.91.0045270-Баку, 1991-с. 25.

48. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Садыхов Б.М. Расчетные формулы для уравнений линии электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны // Техн. электродинамика, -1991- №1 - с. 85-92.

49. Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Садыхов Б.М. Погрешность моделирования, сходимость и устойчивость при расчете ползовых процессов в линии с учетом поверхностного эффекта и короны /ДАН Аз. Респуб., сер. физ.-техн. и мат. наук, -1991- №8 - с. 17-20.

50. А.с. (положит. реш. заявк. №4488603/24-87 (СССР). Распределительное устройство. /К.М. Антипов, А.М. Гашимов и др. /от 13.12.89г.

51. А.с. (положит. реш. от 30.03.02 Заявк. №5005244/07/060064, (СССР). Устройство отключения понижающего трансформатора с изолированной нейтралью /К.М. Антипов, А.М. Гашимов и др. /

52. Гашимов А.М., Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Садыхов Б.М. К вопросу математического моделирования характеристик короны при расчетах волновых процессов в электрических сетях, -Баку, 1992-14с. - (Препр. /АН Аз. Респуб., Ин-т физики; №465).

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, состоит в следующем. В работах [1, 3, 12, 29, 30, 35, 40-42, 48, 49, 52] автору принадлежит постановка проблемы, идея решения, построение моделей, обобщение выводов; работы [11, 13, 14, 17, 19, 21, 22, 27, 31, 33, 37, 38, 47, 50, 51] принадлежат всем авторам поровну; в работах [2, 4-6, 7-10, 15, 16, 18, 20, 23-26, 28, 32, 34, 36, 39, 43-46] автору принадлежит научная постановка задачи, анализ результатов и обобщение выводов.

А. Гашимов

ГАШИМОВ А.М.

Подписано к печати 15.12.92. Заказ 578. Тираж 120.
Бесплатно.

Типография АН Азербайджана

AB 26.380

AB 26.380