

На правах рукописи
УДК 621.372.061

КОВАЛЬЧУК
Роман Николаевич

МАШИННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ

Специальность 05.09.05 – теоретическая электротехника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

АВ. 32.708



00755661 (U)

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электро-
радиотехники Львовского университета им. И.Я.Франко

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Синицкий Л.А.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор Чабан В.И. (г. Львов)
- кандидат технических наук,
ст.н.с. Семагина Э.П. (г. Киев)

Ведущее предприятие - Львовский физико-механический
институт им. Г.В. Карпенко
АН Украины


Защита состоится "21" жовтня 1992 г. в 15 час.
в ауд. 114 на заседании специализированного совета К 068.36.07
по присуждению ученой степени кандидата технических наук в
Львовском политехническом институте.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по адресу:
290646, г. Львов-13, ул. Мира, 12, ауд.114 гл.корп.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке института (ул.Профессорская, 1)

Автореферат разослан "25" листопада 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

 В.В. Попичко

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В связи с быстрым развитием программного обеспечения современных ЭВМ в области теоретической электротехники наряду с аналитическими исследованиями видится актуальным поиск и разработка таких методов анализа, в которых нашли бы отражение новейшие достижения вычислительной математики. В немалой степени это относится к теории электрических систем с распределенными параметрами или длинных линий (ДЛ), которые за последнее время находят все более широкое применение. Строго говоря, в диапазоне СВЧ большой класс цепей следует рассматривать как ДЛ и, следовательно, их анализ должен опираться на теорию дифференциальных уравнений в частных производных, не говоря уже о цепях, элементами которых служат линии электропередач, полосковые линии задержки, волноводы и т.д., для которых анализ возможен только с таких позиций. Трудности поиска аналитических решений уравнений таких систем приводят к необходимости использования численных методов, теория которых значительно продвинулась благодаря работам в области математической физики и вычислительной математики.

С другой стороны, разностные методы нашли самое широкое применение в теории цепей с сосредоточенными параметрами при решении систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).

К сожалению, достижения численного анализа не находят пока должного применения при анализе процессов в ДЛ. За небольшим исключением, здесь превалирует классический подход: после значительных упрощений исходной задачи решение ищут в общем виде, либо конструируются искусственные приемы с использованием численных методов на отдельных этапах. Вопрос строгого обоснования точности решений, как правило, не рассматривается.

Между тем, специфика таких цепей позволяет наилучшим образом сочетать разностные методы при решении систем уравнений как в обыкновенных, так и в частных производных. Дискретизация непрерывных линий по координате, выполненная с учетом аппроксимационных свойств выбранной разностной модели, позволяет перейти к системе ОДУ и использовать богатый опыт исследования устойчивости и сходимости решений таких систем. По мнению автора, такой подход

позволит рассматривать электрические цепи, содержащие сосредоточенные и распределенные параметры, с единых позиций и будет способствовать нахождению решений в тех случаях, когда в аналитическом виде они чрезвычайно громоздки или не могут быть получены принципиально.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование точности схемного метода анализа процессов в ДЛ с удельными переменными и нелинейными параметрами и граничными условиями общего вида, а также изучение возможности применения диакоптического подхода для повышения эффективности и надежности моделирования таких систем на ЭВМ.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие основные задачи :

1. Получение разностных схем, аппроксимирующих дискретные модели ДЛ (ДМДЛ), соответствующих принятым методам численного интегрирования.
2. Вывод условий устойчивости решений ДМДЛ и исследование их диссипативных и дисперсионных свойств с целью получить рекомендации по выбору оптимальных методов интегрирования.
3. Эффективность применения методов диакоптики для увеличения быстродействия алгоритма анализа ДМДЛ на ЭВМ.
4. Обоснование принятого способа согласования подсхем методом простой итерации и определение области устойчивости этого метода.
5. Исследование возможности повышения быстродействия расчета ДМДЛ путем учета и исключения подсхем, латентных по времени и итерациям согласования.
6. Разработка и апробация программы автоматизации машинного анализа динамических режимов ДЛ со сложными граничными условиями, проведение численных экспериментов по моделированию волновых процессов для набора тестовых задач, анализ результатов моделирования и разработка практических рекомендаций по использованию принятого схемного метода в решении прикладных инженерных задач.

Методы исследования. Для решения указанных задач в работе использовались методы теории разностных схем, вычислительной математики и математической физики, элементы топологии и матричной

алгебры, методы численного интегрирования и системного программирования.

Новые научные результаты.

1. Установлено, что для явных по времени ДМДЛ дискретизация с помощью правых-левых, а также центральных разностей, не приводит к устойчивому решению как во времени, так и в пространстве при произвольных соотношениях шагов дискретизации уравнений ДД по времени и координате.

2. Исследованы диссипативные и дисперсионные свойства разностных схем, соответствующих неявным методам интегрирования. Показана тесная взаимосвязь устойчивости решения с понятием диссипативности разностной схемы. Доказана А-устойчивость ДМДЛ, соответствующих неявным методам, для прямой и обратной волн решения уравнений ДМДЛ, и показано, что неявный метод Эйлера обладает значительной положительной диссипацией, особенно в области высоких частот, тогда как для метода трапеций диссипация отсутствует.

3. Показано наличие класса методов интегрирования, отвечающих бездиссипативным и бездисперсионным разностным схемам при определенном соотношении шагов дискретизации τ и h по времени и координате. Доказано, что комбинированный явно-неявный метод, устойчивый при условии $\tau/h < 1$, для случая $\tau/h = 1$ дает точное решение (диссипация и дисперсия прямой и обратной волн отсутствуют).

4. Предложен способ расчета ДМДЛ с граничными условиями в виде N-полосников методом подсхем, при котором ДМДЛ представляется отдельными RLC-подсхемами, связь между которыми осуществляется в определенных временных точках коррекции с помощью дополнительных фиктивных источников тока и напряжения.

5. Показано, что в базисе переменных состояния уравнения связи подсхем имеют минимальную структуру. Для согласования подсхем предложен метод простой итерации, имеющий наибольшую область сходимости. Для линейного случая получено условие сходимости итераций согласования в зависимости от величины шага коррекции $\tau_{кор}$ и показано, что оно совпадает с условием устойчивости разностной схемы для линейной ДМДЛ. Приведены области устойчивости согласования при интегрировании подсхем ДМДЛ методами трапеций и ФДН

1-6 порядков.

6. Для повышения эффективности алгоритма моделирования ДМДЛ предложен учет пространственно-временной и итерационной латентности подсхем. Приводится количественная оценка увеличения быстродействия расчета за счет исключения латентных подсхем, которая не зависит от числа подсхем разбиения ДМДЛ. Показано, что предложенный в работе критерий выбора латентных подсхем совпадает с условием сходимости внешних итераций согласования подсхем.

7. На основании приведенных теоретических положений разработан адаптивный алгоритм автоматизации моделирования динамических процессов в электрических системах с распределенными параметрами, реализованный в виде комплекса программ, с помощью которого проведены многочисленные расчеты тестовых задач для однородных и неоднородных ДМДЛ с линейными и нелинейными параметрами. Сравнительный анализ результатов расчета подтверждает все теоретические положения диссертационной работы.

Практическая ценность работы. В диссертационной работе теоретически обоснована точность схемного метода расчета ДМДЛ, широко применяемого в электротехнике, энергетике, а также в других областях, допускающих электрическую аналогию.

Доказана целесообразность и органичность применения принципов диакоптики, в частности, при моделировании нелинейных ДМДЛ, что может быть особенно эффективно при использовании многопроцессорных вычислительных комплексов.

Установлено, что схемный метод, являющийся по сути разновидностью методов теории разностных схем (метод прямых), с применением итерационной процедуры согласования подсхем становится тождественным непрямым итерационным методам прогонки решения такого типа разностных уравнений, обладающий, однако, большей наглядностью и возможностью физической интерпретации результатов. Отдельные положения работы (использование дисперсионных соотношений и понятия групповой скорости для сравнительной характеристики методов интегрирования, выбор способов и стратегий согласования подсхем, учет пространственно-временной и итерационной латентности подсхем) имеют самостоятельное значение и могут использоваться при построении и модификации алгоритмов в подсистемах САПР.

Разработанный комплекс программ КП ЭЛАН может быть рекомендован при исследовании практических инженерных задач, включающих ДЛ.

Реализация результатов работы. Работа выполнена в рамках комплексной госбюджетной программы 1.12.10.2 АПРОДОС "Автоматизация проектирования динамических объектов и систем", утвержденной Минвузом УССР от 24.04.81 г.

На базе теоретических и практических положений работы реализован КП ЭЛАН, зарегистрированный в государственном фонде алгоритмов и программ (Акт регистрации приведен в диссертации). Результаты работы используются в научно-исследовательской и учебной практике Львовского университета.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на республиканских школах-семинарах (Львов-Шацк, 1986, 1988, 1991 гг.), а также на ряде республиканских и межвузовских конференций.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в девяти печатных работах. Перечень публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав с выводами, изложенных на 124 страницах машинописного текста, списка литературы, включающего 90 наименований и двух приложений. Работа содержит 18 рисунков и 5 таблиц.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы анализа электрических систем, включающих элементы с распределенными и сосредоточенными параметрами, сформулированы вопросы, решаемые в работе, приведено краткое изложение материала по главам диссертации.

В первой главе приведена постановка задачи численного анализа одномерной распределенной электрической системы - ограниченной N-проводной связанной ДЛ с граничными условиями в виде N-полюсников с сосредоточенными параметрами. Рассматривается одномерная волновая система

$$A_0(V) \cdot V_x^2 + B_0 \cdot V_t^2 + Q_0^-(V) \cdot V = 0, \quad 0 < x < N_{\text{лин}} \quad (1)$$

с начальными условиями $V(x,0) = f(x)$ и условиями на границах

$$V(0,t) = P_1(V_1, V_1', V_1'', \dots, t),$$

$$V(N_{\text{лин}}, t) = P_n(V_n, V_n', V_n'', \dots, t),$$

где $V(x,t) = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T = [U(x,t) \ I(x,t)]^T$ - N -мерный вектор независимых переменных (напряжений и токов),

$$A_0(V) = \text{diag}[C_0(V) \ L_0(V)], \quad Q_0(V) = \text{diag}[G_0(V) \ R_0(V)] -$$

блочко-диагональные квадратные $N \cdot N$ матрицы удельных параметров, $B_0 = \text{const}$ - постоянная матрица.

Удельные параметры линии постоянны или изменяются вдоль координаты (неоднородная линия), а также могут зависеть от токов и напряжений в линии (линия с нелинейными удельными параметрами).

Следуя традиции, модели ДЛ часто представляются не системами уравнений вида (1), а полученными на их основе ячейками замещения с 2-полюсными RLC-элементами, параметры и способ соединения которых определяются свойствами такой линии. Такими же схемами замещения обычно задаются оконечные N -полюсники P_1 и P_3 . Если их подсоединить к ДМДЛ, представленной последовательно соединенными M подсхемами замещения в виде $2N$ -полюсников P_{2m} , $m = 1, \dots, M$, то в качестве модели исходной системы получим некоторую полную схему с сосредоточенными параметрами, описываемую системой ОДУ.

Уравнения полной схемы в базисе переменных состояния сводятся к нормальной форме Коши

$$dX/dt = A \cdot X + B \cdot P, \quad X(t=0) = X_0, \quad (2)$$

где $X = (U_0 \ I_1)^T$ - вектор состояния, $z = (E \ J)^T$ - вектор источников напряжения и тока.

Аппроксимация системы (1) системой (2) удовлетворяется автоматически применением схемного метода. Переход к системе (2) ДМДЛ путем дискретизации системы (1) по координате с шагом $h = N_{\text{лин}}/M$

накладывает ограничения на способ дискретизации - допускаются только левые-правые разности первого порядка аппроксимации относительно h . Применение центральных разностей высших порядков противоречит выводу уравнений элементарного RLC-звена по законам Кирхгофа. Следовательно, схемный метод допускает дискретизацию правой части (2) вида

$$dX/dt = D_x \cdot X[m+1, m-1],$$

m - индекс дискретизации по координате, он же номер подсхемы замещения ДМДЛ. Оператор дискретизации левой части системы (2) определяется принятыми методами интегрирования

$$dX/dt \rightarrow D_t \cdot X[n+1, n, n-1, n-2, \dots],$$

n - индекс дискретизации по времени.

Несмотря на широкое применение, точность такого подхода к решению системы (1) исследована недостаточно; в частности, не решен вопрос инвариантности законов сохранения для прямой и обратной волн.

Таким образом, в работе рассмотрен вопрос получения решения уравнений ДМДЛ на сетке $[n\tau, mh]$ и исследуется устойчивость такого решения для различных видов оператора дискретизации $D_t \cdot X[n]$. В отличие от системы ОДУ, здесь область устойчивости определяется для соотношения шагов дискретизации $\gamma = \tau/h$.

Для левых методов интегрирования системы (2) ($D_t \cdot X[n, n-1, n-2, \dots]$), применяя метод разделения переменных по времени и координате

$$i[m, n] = I[m] \cdot R[n], \quad u[m, n] = U[m] \cdot S[n],$$

получаем характеристические уравнения $F_n(p) = 0$, $F_m(q) = 0$ для пространственной и временной составляющих решения. Для левых-правых разностей условия устойчивости $\text{mod}(p) < 1$, $\text{mod}(q) < 1$ выполняются при условии $\gamma < 1$ (ограниченная устойчивость), что совпадает с известным условием Фридрихса-Курранта-Леви.

Из семейства неявных методов интегрирования рассмотрим разностные схемы вида

$$X[n+1] - X[n] = (1-b) \cdot f(X[n]) + b \cdot f(X[n+1]),$$

соответствующие неявному методу Эйлера (НМЭ, $b=1$) и методу трапеций (МТ, $b=0.5$). Для исследования устойчивости используем спектральный признак Неймана (собственные числа P оператора перехода решения из слоя $[n]$ на слой $[n+1]$ должны лежать в радиусе единичной окружности на комплексной плоскости

$$P(\alpha) = g(\alpha) + j \cdot d(\alpha), \quad \text{mod}(P(\alpha)) < 1,$$

где $\alpha = 0,2\pi$ - некоторый параметр. Подставив решения вида

$$V[m, n] = V_0 \cdot P^n(\alpha) \cdot \exp(j\alpha m), \quad V_0 = (U_0 \ I_0)^T,$$

в соответствующую разностную схему, сокращая подобные члены и приравнявая детерминант системы нулю, получаем характеристическое уравнение, из которого находим собственные числа оператора перехода $P(\alpha, r)$. В результате для НМЭ получаем A -устойчивую диссипативную, а для МТ - бездиссипативную A -устойчивую разностную схему.

Дальнейшее исследование оператора перехода показывает его избирательное действие по диапазону частот, что объясняется дисперсией разностной схемы - зависимостью скорости отдельной волны от ее длины, и определяется дисперсионным соотношением (ДС) $\omega(k)$, ω - частота, k - волновое число. Подставив решение вида

$$V(x, t) = V_0 \cdot \exp[j(\omega t - kx)]$$

в разностные схемы методов НМЭ и МТ и сократив подобные члены, получаем ДС для

$$\text{НМЭ :} \quad \sin(\omega\tau) = r \cdot \sin(kh/2),$$

$$\text{МТ :} \quad \text{tg}(\omega\tau/2) = r \cdot \sin(kh/2),$$

или с точностью до членов порядка kh

$$\text{НМЭ :} \quad \omega/k = a_0/2, \quad \text{МТ :} \quad \omega/k = a_0, \quad a_0 = (L_0 \cdot C_0)^{-0.5},$$

то есть для МТ дисперсия значительно меньше, чем для НМЭ. Для комбинированного метода КМ (явный по току и неявный по напряжению)

получаем ДС вида

$$\text{КМ : } \sin(\omega\tau/2) = \Gamma \cdot \sin(kh/2) \quad \text{или} \quad \omega/k = \alpha_0,$$

причем метод устойчив для $\Gamma < 1$ и дает точное решение для $\Gamma = 1$.

Исследование ДС для ДМД с потерями ($Q_0 \neq 0$) показывает, что условие $\Gamma = 1$ и здесь сохраняет свое определяющее значение. Такой же вывод получается и при исследовании дискретизации граничных условий.

Во второй главе обосновывается применение диакоптического подхода к анализу уравнений (2) ДМД. Поскольку методы интегрирования полной системы (2) никак не учитывают специфику матриц таких систем (блочно-диагональные матрицы), в работе предложен метод раздельного интегрирования (РИ). В пользу такого подхода приводятся следующие соображения:

- а) естественность деления полной схемы на части по функциональному признаку;
- б) автоматическое разделение на "быстрые" и "медленные" переменные;
- в) возможность в отдельных случаях получать аналитические решения уравнений подсхем, что упрощает процесс согласования;
- г) простота учета и исключения латентных блоков;
- д) алгоритмическая однородность расчета подсхем ДМД и граничных N-полюсников;
- е) существенная экономия оперативной памяти при реализации алгоритма на ЭВМ.

Согласование подсхем в точках Ткор осуществляется с помощью дополнительного вектора переменных связи Y, в качестве которого принимается вектор фиктивных источников тока и напряжения $Y = (EP \ JF)^T$; в результате система (2) распадается на уравнения состояния отдельных подсхем

$$dX_m/dt = A_m \cdot X_m + B_m \cdot (EP[m-1] \ JF[m+1])^T, \quad m=1, \dots, M \quad (3b)$$

и уравнения связи

$$D_1 \cdot Y + D_2 \cdot X = 0 \quad \text{или} \quad D \cdot (X \cdot Y)^T = 0. \quad (3c)$$

После дискретизации и линеаризации система (3) представляется линейным матричным уравнением

$$BDO \cdot X = G \quad (4)$$

где BDO - блочно-диагональная матрица с окаймлением. Система (4) состоит из уравнений подсхем

$$P_m \cdot X_m[n+1] = G_m - C_m \cdot Y[n+1] \quad (5a)$$

и уравнений связи

$$Y[n+1] = R - D_m \cdot X_m[n+1] \quad (5b)$$

Приняв условие согласования подсхем в виде равенств

$$EP[m] = U_0[m+1], \quad JP[m] = I_1[m-1],$$

воспользуемся методом простой итерации, вытекающим из системы (5) после исключения $X_m[n+1]$

$$Y[j+1] = K \cdot Y[j]$$

где $j=1, 2, \dots, J$ - цикл внешних итераций согласования,

$K = K(r)$ - некоторая матрица.

Достаточное условие сходимости согласования подсхем

$$\|K\| < 1,$$

где $\|K\|$ - норма матрицы K .

Ниже приводятся полученные в работе области сходимости итераций согласования для наиболее употребляемых неявных методов

МТ	НМЭ	ФДН-2	ФДН-3	ФДН-4	ФДН-5	ФДН-6
$r < 2$	$r < 1$	$r < 3/2$	$r < 11/6$	$r < 25/12$	$r < 137/60$	$r < 147/60$

В работе использована адаптация алгоритма согласования к нелинейным и инерционным свойствам отдельных подсхем. С этой целью разработаны и реализованы различные стратегии согласования (продольное, поперное и смешанное), различие между которыми состоит в

том, на каком этапе, дискретизации или линеаризации системы (2), производится внешний цикл коррекции. Также исследована и реализована адаптация алгоритма по величине $\tau_{кор}$. Значение $\tau_{кор}$ или задает самая "медленная" подсхема, или оно принимается по внешнему условию $\gamma = 1$.

Применение метода РИ позволило легко реализовать процедуру ИТ учета и исключения латентных подсхем. Статус латентности принимался по максимальной относительной погрешности согласования в сечениях, принадлежащих данной подсхеме. В работе приводится коэффициент увеличения быстродействия расчета для алгоритма ИТ, зависящий от J и не зависящий от M .

Третья глава посвящена принципам построения алгоритма автоматизации машинного моделирования ДМДЛ в виде комплекса программ ELAN для микро-, мини- и персональных ЭВМ, численным экспериментам по расчету ряда тестовых задач, содержащих однородные и неоднородные ДМДЛ с линейными и нелинейными удельными параметрами и обсуждению результатов расчета.

В качестве линейной однородной ДМДЛ принималась модельная задача короткозамкнутой, открытой или нагруженной на волновое сопротивление линии, на вход которой подавалось единичное постоянное или гармоническое напряжение, или прямоугольный импульс. В зависимости от цели исследования линия разбивалась на отдельные подсхемы, количество которых M принималось от 2 до 50. В свою очередь, в каждой подсхеме допускалось от 1 до 50 RLC-ячеек. В блоке интегрирования в качестве основного принимался МТ, а в отдельных случаях для сравнения - НМЭ и метод Шичена (ФДН-1, ФДН-2). При необходимости результаты сравнивались с известным из литературы точным аналитическим решением ДМДЛ, полученным операторным методом в виде суммы тригонометрического ряда.

Для исследования неоднородных ДМДЛ принимались тестовые задачи с экспоненциальным

$$C_0(x) = C_0 \cdot \exp(-kx), \quad I_0(x) = I_0 \cdot \exp(-kx)$$

и гармоническим законами неоднородности

$$C_0(x) = C_0 \cdot \sin(kx), \quad I_0(x) = I_0 \cdot \sin(kx), \quad 0 < kx < \pi/2,$$

имеющих постоянное волновое сопротивление $Z(x) = Z_0$ и скорость распространения волны соответственно

$$a(x) = a_0 \cdot \exp(kx) \quad \text{и} \quad a(x) = a_0 / \sin(kx), \quad (6)$$

что позволяет корректно оценивать результаты моделирования.

Нелинейные ДМДЛ исследовались на примере системы гиперболических уравнений

$$V_t^* + A(V) \cdot V_x^* = 0,$$

где нелинейные емкости и индуктивности моделировались по следующим законам

$$C(u) = C_0 \cdot \exp(u/U_1), \quad L(i) = L_0 + L_1 \cdot \arctg(i/I_1).$$

Коэффициенты аппроксимации C_0, U_1, L_0, L_1, I_1 принимались из условия изменения $C(u), L(u)$ не более чем в 2-3 раза по сравнению с линейным случаем.

Сравнительный анализ результатов моделирования показал следующее. В случае негладких решений для отображения фронта волны в однородной ДМДЛ с относительной точностью 10^{-6} требуется значения M , равные 2000-2500, тогда как практически удовлетворительная точность 10^{-3} достигается при $M = 200-300$. Превышение быстродействия РИ алгоритма по сравнению с расчетом полной схемы достигается при $M > 20 - 25$ как для линейного, так и для нелинейного случаев. Количество итераций согласования имеет тенденцию уменьшаться к некоторому установившемуся значению с ростом номера шага коррекции при расчете ДМДЛ с нулевыми и ненулевыми начальными условиями, причем для точности согласования 10^{-6} $J_{\max} = 25 - 30$, а для точности 10^{-3} $J_{\max} = 3-5$ при $\gamma = 1$. Порог латентности подсьем на практике достаточно принимать равным 10^{-6} , при этом количество латентных подсьем на интервале времени равном периоду процесса в линии, колеблется в пределах 65 - 75 % для линейного и нелинейного случаев. Способ продольного согласования дает преимущество для "нежестких" ДМДЛ с гладкими решениями; для согласования "жестких" подсьем (особенно граничных N-полюсников) и решений с разрывами (ударные волны) рекомендуется применять способы попарного и смешанного согласования. При разбиении ДМДЛ на подсьемы следует стре-

миться к минимальному уровню вложенности элементарных RLC-звеньев (в пределе - одно звено на подсхему). Расчет неоднородных ДМДЛ подтверждает правомерность схемного подхода: скорости распространения импульсов соответствуют выражениям (6), а затухание соответствует линейному случаю. Для нелинейной ДМДЛ принятый метод адекватно отображает качественные характеристики таких систем - наличие разрывных решений. В точках разрыва решения выглаживаются, поскольку расчетная ДМДЛ обладает аппроксимационной вязкостью.

В приложениях представлены результаты моделирования ряда тестовых задач, содержащих линейные, нелинейные и неоднородные ДМДЛ, при помощи КП EPLAN и Акт регистрации КП EPLAN в ФАП.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. Построены разностные модели уравнений ДЛ, соответствующие принятому в работе схемному методу расчета. Показано, что порядок аппроксимации уравнений по координате не может быть выше первого, тогда как порядок аппроксимации по времени определяется порядком принятого метода интегрирования.

2. Исследована устойчивость полученных разностных моделей. Показано, что явные методы семейства Башфорта порождают неустойчивые разностные схемы для левых-правых и центральных разностей по времени в зависимости от соотношения шагов τ . Неявный метод Эйлера и метод трапеций приводят к A-устойчивым разностным схемам. Явно-неявный комбинированный метод устойчив при $\tau < 1$, причем для случая $\tau = 1$ дает точное решение.

3. Исследованы диссипативные и дисперсионные свойства устойчивых разностных схем. Показано, что для всех $\tau > 0$ метод трапеций является бездиссипативным, тогда как для комбинированного метода диссипация отсутствует только для случая $\tau = 1$. Неявный метод Эйлера диссипативен для всех значений τ . Все три рассмотренных метода обладают дисперсией (кроме случая $\tau = 1$ для комбинированного метода).

4. Теоретически обоснована целесообразность диакоптического подхода при схемном методе расчета ДМДЛ с использованием раздельного интегрирования и согласования отдельных подсхем с помощью

фиктивных источников тока и напряжения. На практике доказано, что с ростом числа подсхем увеличивается эффективность такого подхода по сравнению с расчетом полной схемы.

5. Предложены и исследованы продольный и попарный способы согласования подсхем. По результатам многочисленных экспериментов определено, что в общем случае оба способа равноценны, но при наличии жестких подсхем способ попарного согласования имеет преимущество по быстродействию.

6. Для согласования подсхем предложен и исследован метод простой итерации. Доказано, что при решении уравнений подсхем в базисе переменных состояния такой способ обусловлен топологией и приводит к минимально возможной структуре уравнений. Получено условие сходимости итераций согласования, которое для линейного случая совпадает с необходимым условием устойчивости Фридрихса-Курранта-Леви соответствующей разностной схемы.

7. Для повышения эффективности алгоритма расчета ДМД предложен простой способ учета подсхем, латентных по времени и по итерациям согласования. При помощи численных экспериментов на ЭВМ установлено, что исключение подсхем на интервале их латентности из дальнейшего расчета позволяет получить выигрыш во времени в 3-5 раз для моделей с решениями, близкими к разрывным.

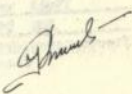
8. По результатам численных экспериментов установлено, что оптимальный по быстродействию способ разбиения линии на подсхемы заключается в том, чтобы каждая подсхема состояла из минимального числа элементарных RLC-звеньев, соответствующих шагу дискретизации линии по координате (в пределе каждая подсхема содержит одно RLC-звено).

9. Разработан комплекс программ автоматизации расчета динамических режимов ДЛ со сложными границами, зарегистрированный в государственном фонде алгоритмов и программ. КП ELAN апробирован на многочисленных задачах, содержащих однородные и неоднородные ДЛ с линейными и нелинейными удельными параметрами. Результаты расчетов подтверждают все выводы настоящей работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Ковальчук Р.Н., Мочульский Ю.С., Стахий П.Г., Шегедина О.А. Сравнение программ расчета динамических режимов радиозлектронных схем. - В кн.: Межвузовский сб. трудов. М.: Моск. энергет. ин-т, 1983, № 21, с. 70-75.
2. Ковальчук Р.Н. Разностные модели диссипативной 2-проводной длиной линии. Материалы II конф. мол. ученых физ. фак-та. Львов, 1986. Деп. в УкрНИНТИ № 2790 - Ук86. с. 9-10.
3. Ковальчук Р.Н. Анализ длинных линий с помощью метода разбегания. - Теоретическая электротехника. - 1986. - Вып. 41, с. 135-139.
4. Ковальчук Р.Н. Расчет на ЭВМ дискретных моделей ЛЭП. - Теоретическая электротехника. - 1987. - Вып. 43. с. 155-159.
5. Ковальчук Р.Н., Мочульский Ю.С., Хвищун И.А. ДИНАМИКА - подсистема анализа нелинейных радиозлектронных схем. - Теоретическая электротехника. - 1987. - Вып. 44. с. 134-142.
6. Ковальчук Р.Н. Моделирование на ЭВМ динамических режимов длинных линий со сложными границами. - Теоретическая электротехника. - 1988. - Вып. 45. с. 123-132.
7. Ковальчук Р.Н. Оценка погрешности численного решения уравнений длиной линии методом подсхем. - Теоретическая электротехника. - 1988. - Вып. 46. с. 19-29.
8. Ковальчук Р.Н. О реализации метода подсхем при расчете дискретных моделей длинных линий на ЭВМ. - Теоретическая электротехника. - 1991. - Вып. 50. с. 47-54.
9. Ковальчук Р.Н., Ковальчук Н.О. Программа численного анализа динамических режимов в электрических системах с распределенными параметрами. /Львовский госуд. ун-т.- Львов, 1991. - 126 с. - Деп. в ФАП АН УССР 21.06.91, № АПО316.

Работы в соавторстве [1,5] выполнены при равном творческом участии, в работе [9] соискателем выполнен весь объем работ, кроме оформления сопроводительной документации.



ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Подп. к печати 11.04.91. Формат 60x84¹/16
Бумага типограф. № 2. Офс. печ. Усл.печ. л 1
Усл. крас.-отт. 1 Учетно-изд. л 2,93
Тираж 100 экз. Зак. 69 .Бесплатно

ЛПМ 290646 Львов-13, Мира, 12

Учесток оперативной печати опытного завода ЛПМ
Львов, ул. 1-го Мая, 286

453964

AB 32.708

AB 32.708