1. Фурсанов М. И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Мн.: Тэхналогія, 2000. – 247 с.

2. Обучающая диалоговая система для оценки, нормирования и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов, О. А. Жерко, В. Г. Королюк, А. В. Вериго // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 1–2. – С. 30–34.

3. Фурсанов М. И., Муха А. Н. Программно-вычислительный комплекс «GORSR» для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10 (6) кВ // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 3. – С. 34–39.

4. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.

5. Моделирование разомкнутых электрических сетей в условиях АСУ / М. И. Фурсанов, О. А. Жерко, А. Н. Муха // Материалы междунар. 53-й науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА. – Мн.: БГПА, 1999. – С. 10.

6. Ветцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: Учеб пособие для втузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.

7. Будзко И. А., Зуль Н. М. Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 14.12.2004

УДК 621.382.2:53.072

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. СЫЧИК В. А., инженеры УЛАСЮК Н. Н., ШУМИЛО В. С.

Белорусский национальный технический университет

В связи с эффективным внедрением интегральной технологии в производство многофункциональных измерительных преобразователей, сформированных на основе полупроводниковых приборных структур, резко возрастает количество пленочных компонентов. В процессе разработки измерительных преобразователей (ИП) возрастает необходимость анализа и параметрической оптимизации переходных характеристик таких структур.

Решение данных вопросов при минимальных вычислительных затратах производим с помощью макромоделей полупроводниковых ИП, воспроизводящих с достаточной степенью адекватности поведение схемы ИП для входных, передаточных и выходных характеристик. При формировании электрической модели ИП используем принципы упрощения, на основании которых синтезируем их формальные и блочные макромодели.

Обобщенную схему формальной модели ИП формируем из следующих блоков (рис. 1а): входного, реализующего динамические входные характеристики и функцию преобразования; промежуточного, обеспечивающего заданные динамические характеристики и статическую передаточную характеристику; выходного, воспроизводящего выходную характеристику.

При этом входные и выходные блоки представляют соответственно входные и выходные цепи моделируемых элементов базисов преобразователей, а промежуточный блок описывается аналитическими выражениями или эквивалентными схемами. Поскольку входные характеристики ИП обычно имеют нелинейный комплексный характер, генератор тока с входным сопротивлением должен выражаться функцией вида $R_{вх} = f(U_{вх}, t)$.

Электрическую схему формальной модели измерительного преобразователя излучений (ИПИ) (рис. 1б) формируем в соответствии со структурной схемой (рис. 1а).

Эквивалентная схема входного блока ИПИ (рис. 1г) включает $R_{вх} = R_{вх.н} + R_{вх.у}$ и источник тока $I_{вх}$. Составляющая $R_{вх.у}$ отражает характер изменения электрических свойств входного блока при воздействии преобразуемого излучения $N_{Z(вх)}$, а $R_{вх.н}$ – независящая от преобразуемого воздействия составляющая, учитывающая изменения параметров других элементов блока. Промежуточный блок (элементы E_1, R_1, C_1) реализует передаточную и переходную характеристики. Динамические свойства схемы ИПИ реализуются в блоке задержек макромодели, который в соответствии со статической передаточной характеристикой определяет длительность задержки выходного сигнала.

Выходной блок, основной функцией которого является воспроизведение статических выходных характеристик $I_{вых} = f(U_{вых})$, как обязательный элемент содержит источник тока $I_{вых}$, задающий соответственно выходной ток. В схему замещения также входит выходное сопротивление $R_{вых}$, изменение которого учитывается путем включения в выходную цепь зависимого источника напряжения E_2.

Для создания макромоделей полупроводниковых ИП способом исключения отдельных компонентов из схемы в различных режимах работы используем теорию чувствительности [1]. При формировании макромодели ИП излучения интенсивности $N_{вх}$ производим сравнение чувствительности выходного напряжения со всеми параметрами элементов схемы ИП для трех участков статической передаточной характеристики $U_{вых} = f(N_{вх})$ (1, 2, 3) (рис. 1в). Для каждого участка выделяем главные элементы, чувствительность которых намного выше, чем других. Главные элементы затем включаем в макромодель, а вспомогательные не рассматриваем.

Формальную электрическую модель многовходного ИПИ с логической функцией преобразования описываем статической $I_{вх.i}(U_{вх.i})$ и динамической входной $I_{вх.i}(U_{вх.i}, dU_{вх}/dt)$ характеристиками, статической передаточной характеристикой при холостом ходе на выходе

$$U_{вых.j}(U_i) i = 1 \ldots m, \quad j = 1 \ldots n.$$

Структура синтезированной формальной модели многовходного ИПИ представляет эквивалентную схему m входных и n выходных блоков (рис. 1д). Источник тока $I_{вх.i}$ моделирует статическую емкость $C_{вх.i}$ – динамическую входную характеристику преобразователя. Источник напряжения E_i моделирует статическую передаточную характеристику $U_{вых} = f(U)$, где определяющее напряжение U есть функция входных переменных. С помощью выходной $R_jC_{вых.j}$ цепи моделируется переходная характеристика j-го выхода. Значение напряжения источника равно напряжению на

емкости, а в статическом режиме – напряжению источника E_i. Источник тока $I_{вых.j}$ позволяет учесть нагрузочную способность элемента.

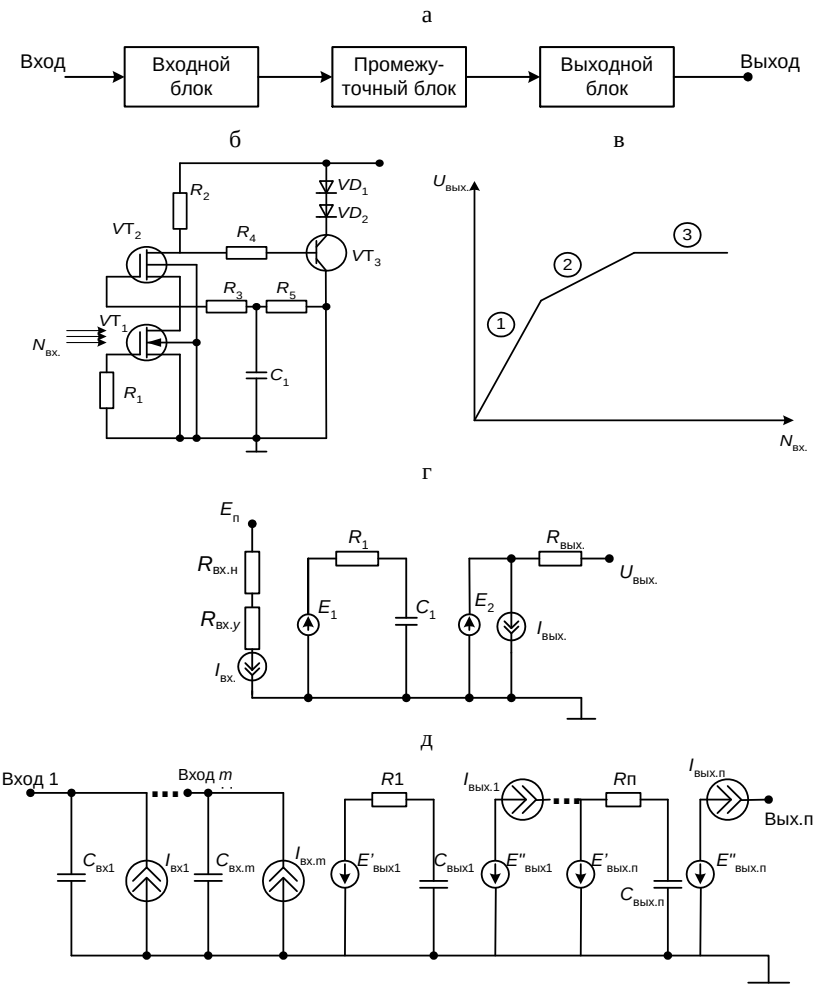

Рис. 1. а – обобщенная структурная схема формальной модели ИП; б – электрическая схема ИПИ; в – его передаточная характеристика; г – эквивалентная схема преобразователя излучения; д – обобщенная формальная модель многовходного ИПИ

Все блоки, моделирующие статические характеристики ИП, описываются кусочно-линейными функциями типа $y = a_k x + b_k$, $k = 1…n$, где y – любая из функций, описывающих $I_{вх.i}$, $E_j^{'}$, $I_{вых}$; x – соответствующие им аргументы $U_{вх.i}$, $U_{вых.j}$, U.

Чтобы с достаточной степенью точности смоделировать переходную характеристику ИП, выделяем на ней несколько характерных участков, в каждом из которых задаем свою постоянную времени $\tau_j = R_j C_{вых.j}$, причем обычно R_j = const; $C_{вых.j}$ = var.

Если достигнутая с помощью формальных макромоделей точность расчета невысока, то используем адекватные (блочные и схемные) макромодели, синтез которых в общем случае проводим на основе снижения порядка алгебродифференциальных уравнений, описывающих статику и динамику ИП.

Для многовходного ИП, работающего на RC-нагрузку (рис. 2), связь между входными и выходными напряжениями в адекватной модели получаем из решения системы уравнений Кирхгофа:

$$U_{\text{вых1}}(A_{11}d^2/dt^2 + A_{21}d/dt + 1) = U_{\text{вх1}}(B_{11}d^2/d^2t + B_{21}d/dt + 1) - U_{\text{э1}};$$
$$U_{\text{вых}.n}(A_{1n}d^2/dt^2 + A_{2n}d/dt + 1) = U_{\text{вх}.n}(B_{1n}d^2/d^2t + B_{2n}d/dt + 1) - U_{\text{эп}}. \quad (1)$$

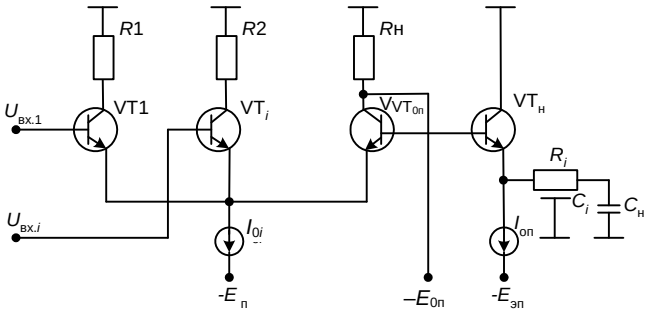

Рис. 2. Электрическая схема многовходного полупроводникового ИП

Здесь $U_{эп} = \varphi_т \ln I_{эп}/I_{э0}$ – напряжение на эмиттерном переходе; $I_{э0}$ – статический эмиттерный ток:

$$A_{1n} = \tau_э(\tau_{м.вх} + R_1C_{м.вх})(1 + R_{м.вх}/R_м);$$

$$A_{2n} = \tau_э(1 + R_1/R_м) + C_{м.вх}(r_э + R_{м.вх}(1 + r_э/R_м));\ B_{1n} = \tau_э\tau_{м.вх};$$

$$B_{2n} = \tau_э + \tau_{м.вх};\ \tau_э = r_э(C_{j0} + \tau_{тN}\lambda I_э);\ \tau_{м.вх} = C_{м.вх}R_{м.вх};\ \lambda = 1/\varphi_т.$$

Здесь $\varphi_т/I_э = r_э$; $R_1 = R_{бп} + R_{ба}(C_{кп}/C_{jc})$ – приведенное сопротивление базы; $C_{м.вх}$, $R_{м.вх}$ – емкость и сопротивление, моделирующее входное сопротивление ИП.

Для расчетов параметров ИП с повышенной точностью коэффициенты A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n} вычисляются на каждом временном шаге решения системы.

При составлении уравнений адекватной модели ИП сделаны следующие допущения:

1) исходные значения I_0 = const; U_{0n} = const;

2) параметры триодных структур ИП идентичны;

3) ВАХ эммитерных переходов представлены в виде кусочно-линейной аппроксимации $U = \varphi_т \ln I_э/I_{э0} + ir_э$.

При аппроксимативном снижении порядка результирующего алгебродифференциального уравнения использовались выражения, связывающие напряжение между внутренними базовыми точками входной и опорной триодных биополярных структур, а также напряжения на входе и выходе [2]:

$$U_{ББi} = (U_{вх.i} - U_{0n} + d/dtC_1R_2(U_{ki} - U_n))/(1 + g_{1i} + g_{2i});$$

$$g_{1i} = (R_э + R_1/\beta + 1)g_{3i};$$

$$g_{2i} = R_2C_1(1 + g_{1i}) + (R_1 + R_2)(C_{jc} + \tau_{тN}\lambda g_{3i}); \quad (2)$$

$$g_{3i} = I_0 \exp\lambda U_{ВВi} / (1 + \sum \exp\lambda U_{ББi})(1 + \exp\lambda U_{ББi}),$$

где $U_{вх.i}$ – напряжение на входе i-й триодной структуры m входного ИП; $R_2 = R_{БА} C_{КА} / C_{JC}$; C_{JC} – включающая емкость коллектора триодной структуры ИП.

Зависимости коллекторных токов активного и опорного триодов от $U_{ББi}$ в адекватной модели ИП представляются в виде:

$$I_{Ki} = I_0 - I_{КП}; \tag{3}$$

$$I_{КП} = I_0 / (1 + \sum \exp\lambda U_{ББi}). \tag{4}$$

Для коллекторных узлов, к которым подключены емкости нагрузки $C_н$, выполняются следующие соотношения:

- для прямого выхода

$$U_п(1 + C_н U_л dI_0/dt) = U_л / I_0 (I_{КП} - C_1 U_н d/dt); \tag{5}$$

- для инверсного выхода

$$U_{кi}(1 + C_н U_л d/I_0 dt) = U_л / I_0 (I_{КП} + C_1 d(U_{вх\,i} - U_{ki})/dt). \tag{6}$$

Система уравнений (2)...(6) представляет адекватную модель многовходного ИП, типовая электрическая схема которого изображена на рис. 2, а ее блочная структура – на рис. 3. Каждый из блоков также описывается соответствующим уравнением (2)...(6), а последовательность использования уравнений в адекватной модели ИП осуществляется по указанным на схеме стрелками направлениям.

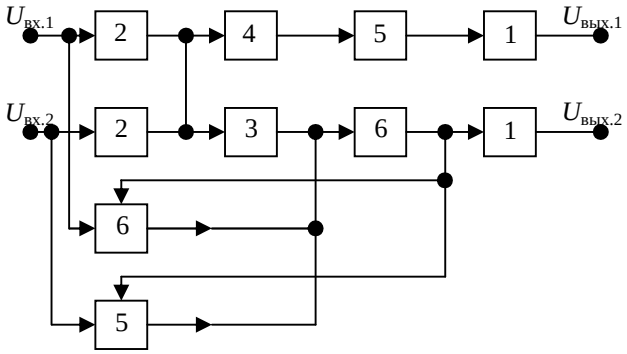

Рис. 3. Блочная структура адекватной макромодели многовходного ИП

В Ы В О Д Ы

1. Электрические модели полупроводниковых ИП позволяют эффективно использовать методики поэтапного проектирования, что обеспечивает объединение схемотехнического и логико-функционального этапов проектирования, причем необходимая часть структуры ИП может моделироваться на компонентном уровне, а другая – на уровне функциональных макромоделей.

2. Основными типами электрических макромоделей, используемых при моделировании многофункциональных полупроводниковых ИП для точных расчетов характеристик синтезируемых структур, следует считать

приближенные макромодели, которые строятся на основе более простой исходной схемы на компонентном уровне, и формальные макромодели, базирующиеся на формальной аппроксимации внешних характеристик многофункциональных ИП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бубенников А. Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высш. шк., 1989. – 320 с.

2. Архангельский А. Я. Модели полупроводниковых приборов для машинного расчета электронных схем. – М.: МИФИ, 1978. – Ч. 1. – 109 с.

Представлена НИЛ сетевых информационных технологий

Поступила 1.07.2002

УДК 621.311

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Канд. техн. наук, доц. ПОЛУЯНОВ М. И.,
инж. СЧАСТНАЯ Е. С., студ. МОИСЕЕНКО Ю. А.

Белорусский национальный технический университет

Для определения мест однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ) – наиболее распространенных повреждений в распределенных сетях с изолированной нейтралью – используются стационарные высокочастотные устройства тонального диапазона [1…3]. При этом, как правило, выявляется лишь эквивалентное сопротивление или расстояние от центра питания до места замыкания. Следовательно, при наличии в линиях нескольких достаточно длинных ответвлений, что характерно для распределительных сетей, в зону дальнейшего поиска поврежденного элемента путем обхода включаются до 3...4 участков длиной 2…3 км каждый. По этой причине способы поиска мест однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью, базирующиеся на стационарных высокочастотных устройствах и сводящиеся к определению эквивалентных величин, недостаточно эффективны в разветвленных распределительных сетях. Целесообразна разработка таких приемов использования стационарных высокочастотных устройств тонального диапазона, которые в распределительных сетях 6–10 кВ позволили бы:

- четко определить поврежденный участок разветвленной сети;
- сузить зону поиска поврежденного элемента путем обхода;
- создать предпосылки для автоматизации ряда операций процесса поиска.

Для этого следует выбрать такой информационный параметр, создаваемый высокочастотным источником в распределительной сети при однофазных замыканиях на землю, который удовлетворял бы перечисленным требованиям.