



ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

Система автоматизованого проектування

**ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ
ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ**

Загальні вимоги

ДСТУ 2638—94

Видання офіційне

БЗ № 2,3—94/158

ДЕРЖСТАНДАРТ УКРАЇНИ
Київ

ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ОПЕРАЦІЙНИХ
ПІДСИЛЮВАЧІВ
Загальні вимоги

ДСТУ
2638—94

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАЦИОННЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ
Общие требования

SYSTEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN

DEVELOPMENT OF OPERATIONAL
AMPLIFIER'S MODELS
General requirements

Чинний від 01.07.95

Цей стандарт поширюється на математичні моделі інтегральних мікросхем (ІМС) операційних підсилювачів (ОП), які використовуються в системах автоматизованого проектування (САПР) радіоелектронної апаратури і установлює єдині вимоги до моделей ОП і єдині набори параметрів моделей ОП.

Стандарт призначається для розробників РЕА, які використовують автоматизовані системи схемотехнічного проектування (АСХП), а також для розробників алгоритмів та програм цих систем.

1. Загальні положення

1.1. В залежності від призначення та вимог, які пред'являються до моделей ОП, розроблюються моделі, які класифікуються на такі основні типи:

- 1) лінійні моделі для аналізу схем у частотній області;
- 2) лінійні моделі для аналізу статичних похибок у схемі;
- 3) нелінійні статичні моделі для аналізу низькочастотних схем у режимі великого сигналу;
- 4) нелінійні динамічні моделі для аналізу схем в усіх режимах.

1.2. Моделі будь-якого типу поділяються на моделі універсального та приватного застосування.

Як правило, в моделях приватного застосування не враховуються залежності параметрів від режиму роботи, а використання їх допускається у конкретно застережених режимах або схемах застосування.

Так приватні лінійні моделі для аналізу схем у частотній області часто розраховані на певний тип коректуючих ланцюгів, або на обмежений діапазон частот вхідного сигналу. Приватні лінійні моделі для аналізу статичних похибок розраховуються на певні значення живильних напруг та тип ланцюгів балансування. Найбільш повні нелінійні динамічні моделі дозволяють аналізувати будь-які схеми застосування ОП, але, як правило, займають багато пам'яті та часу електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), а також мають складну методику визначення параметрів.

1.3. У програмах АСхП доцільно мати універсальну нелінійну динамічну модель ОП та ряд приватних моделей для конкретних, часто використовуваних, ділянок застосування.

2. Принципи побудови моделей ОП

2.1. Вимоги до нелінійних моделей ОП

2.1.1. Універсальна нелінійна динамічна модель ОП розроблюється для аналізу інтегральних ОП, значення електричних параметрів яких указуються в нормативній документації (НД), і повинна забезпечувати можливість аналізу схем ОП, як за нормальних, так і за гранично-допустимих значень електричних параметрів.

2.1.2. Модель повинна мати параметри, які розраховуються за електричними характеристиками ОП, наведеними в НД. Дозволяється розраховувати параметри моделі за даними вимірів електричних характеристик ОП відносно його зовнішніх виводів.

2.1.3. Модель повинна відображати електричні властивості ОП при будь-яких допустимих значеннях параметрів, що вказані в технічних умовах (ТУ) на них, тільки за рахунок зміни параметрів моделі.

2.1.4. Модель повинна відображати залежності електричних параметрів ОП від електричних режимів на його виводах у діапазоні допустимих змін (допустимі зміни обмежуються гранично-допустимими режимами застосування по ТУ).

2.1.5. Модель повинна враховувати такі електричні параметри ОП:

- 1) середній вхідний струм (I_{iav});
- 2) різницю вхідних струмів (I_{io});
- 3) напругу зміщення нуля (U_{io});
- 4) коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення на напругу зміщення нуля (K_{svr});
- 5) вхідний опір (R_i);
- 6) коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг (K_{cmr});
- 7) коефіцієнт підсилення напруги (A_u);
- 8) струм споживання (I_{cc});
- 9) вихідний опір (R_o);
- 10) максимальну вихідну напругу (U_{omax});
- 11) вхідну ємність (C_i);
- 12) частоту одиничного підсилення (f_1);
- 13) частоту зрізу (f_{co});
- 14) максимальну швидкість наростання вихідної напруги (SR).

2.1.6. Модель повинна враховувати залежність фазового зсуву та модуля коефіцієнта підсилення напруги від частоти вхідного сигналу.

2.2. Вимоги до лінійних моделей ОП

2.2.1. Приватна лінійна модель ОП для аналізу схем у частотній області і статичних похибок розроблюється для інтегральних ОП, електричні параметри яких встановлюються в НД.

Модель повинна забезпечувати можливість аналізу схем при номінальному значенні напруг джерел живлення та при номінальних або гранично-допустимих значеннях електричних параметрів ОП.

2.2.2. Модель повинна мати параметри, які розраховуються по електричним параметрам ОП, приведеним в ТУ, та довідковим даним, поданими в НД. Можливе розрахування параметрів моделі по даним вимірювання електричних характеристик відносно зовнішніх виводів ОП.

2.2.3. Модель повинна відображати електричні якості ОП при будь-яких допустимих значеннях параметрів, що вказані в ТУ на них, тільки за рахунок зміни параметрів моделі.

2.2.4. Модель повинна враховувати такі електричні параметри ОП:

- 1) середній вхідний струм ($I_{\text{ав}}$);
- 2) різницю вхідних струмів ($I_{\text{іо}}$);
- 3) напругу зміщення нуля ($U_{\text{іо}}$);
- 4) коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення на напругу зміщення нуля ($K_{\text{звр}}$);
- 5) вхідний опір ($R_{\text{і}}$);
- 6) коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг ($K_{\text{сфнр}}$);
- 7) коефіцієнт підсилення напруги ($A_{\text{и}}$);
- 8) вихідний опір ($R_{\text{о}}$);
- 9) вхідну ємність ($C_{\text{і}}$);
- 10) частоту одиничного підсилення ($f_{\text{і}}$);
- 11) частоту зрізу ($f_{\text{сз}}$).

2.2.5. Модель повинна враховувати залежність фазового зсуву та модуля коефіцієнта підсилення напруги від частоти вхідного сигналу.

2.3. Методи побудови моделей ОП

2.3.1. Для побудови моделей ОП використовують формальний, фізичний та комбінований методи.

2.3.2. Формальним методом модель будується тільки по зовнішнім електричним параметрам та характеристикам.

2.3.3. Фізичним методом модель будується на основі внутрішньої структури ОП, а її параметри визначаються по зовнішнім електричним параметрам та характеристикам. Під внутрішньою структурою необхідно розуміти принципіальну електричну схему мікросхеми. Еквівалентна схема моделі будується по принципіальній схемі ОП підставкою на місце компонентів їх моделей.

2.3.4. При комбінованому методі за основу моделі приймається еквівалентна схема, отримана фізичним методом. Параметри моделей компонентів розраховуються по електричним параметрам ОП. Моделі компонентів, які не впливають на значення електричних параметрів ОП, із моделі виключаються і замінюються (при необхідності) елементами, які забезпечують функціонування всієї моделі ОП. Якщо при визначенні параметрів моделі компонента виникає багатозначність, то частина цих параметрів задається довільно (бажано враховувати типові значення цих параметрів), а інші обчислюються по електричним параметрам ОП.

2.3.5. Як приклад у додатку 1 подано опис універсальної нелінійної моделі ОП з вхідним каскадом на біполярних транзисторах, побудованої комбінованим методом. У додатку 2 приведена методика визначення параметрів цієї моделі.

У додатку 3 приведено опис лінійної моделі ОП, побудованої формальним методом, а в додатку 4 — методика визначення її параметрів.

2.4. Базові елементи для побудови моделей ОП

Для введення в програму АСхП моделей ОП, програма повинна мати такий мінімальний набір базових елементів:

1) електричний опір. Двополюсник, струм якого лінійно залежить від прикладеної до нього напруги;

2) постійне джерело струму. Двополюсник, струм якого дорівнює значенню величини заданого параметра;

3) постійне джерело напруги. Двополюсник, напруга на якому дорівнює значенню величини заданого параметра;

4) лінійнозалежне джерело струму. Двополюсник, струм якого лінійно залежить від напруги на іншому двополюснику моделі;

5) лінійнозалежне джерело напруги. Двополюсник, напруга на якому лінійно залежить від напруги на іншому двополюснику моделі;

6) нелінійне табличне джерело струму. Двополюсник, струм якого визначається по заданій таблиці в залежності від напруги на іншому двополюснику моделі;

7) постійна ємність. Двополюсник, струм якого визначається як добуток величини заданого параметра на швидкість зміни прикладеної до нього напруги;

8) біполярний транзистор. Нелінійна модель біполярного транзистора;

9) польовий транзистор з керованим р-п переходом. Нелінійна модель польового транзистора з керованим р-а переходом.

2.5. Точність та ефективність моделей ОП

2.5.1. Модель з розрахованими параметрами для конкретного типонаміналу повинна бути випробувана за допомогою моделювання на програмі АСхП схем виміру електричних параметрів ОП. Для кожного параметра визначається відносна похибка розрахованої величини по відношенню до початкової (вимірної чи приведеної в НД), яку використовували для розрахунку параметрів моделі. Якщо похибка не перевищує 5 %, то розрахунок параметрів моделі виконано правильно.

2.5.2. Вибираючи моделі, необхідно оцінити їх точність та обчислювальну ефективність.

Обчислювальна ефективність складається із двох складових: затрат пам'яті ЕОМ та затрат машинного часу.

2.5.3. Для оцінки затрат пам'яті різними моделями виконують моделювання тестової схеми, яка складається тільки із ОП одного типу, які моделюються однією моделлю. Затрати пам'яті будуть зворотно пропорційними максимальній кількості ОП у цій схемі, яка аналізується програмою.

2.5.4. Оцінку точності та затрат машинного часу проводить на наборі тестових схем, в якій включають схеми типових вузлів РЕА, які використовують конкретні користувачі.

3. Методики визначення параметрів моделей ОП

3.1. Методика визначення параметрів — це система правил, за допомогою яких по електричним параметрам і характеристикам ОП одержують параметри моделі.

Методики визначення параметрів поділяються на два види:

- 1) методики для ручного розрахунку параметрів моделі;
- 2) методики для автоматизованого розрахунку параметрів моделі.

3.2. Під час розроблення методик для ручного визначення параметрів моделей ОП необхідно враховувати такі вимоги та допущення:

1) необхідно визначити спосіб (способи) отримання початкових електричних параметрів ОП;

2) необхідно задавати послідовність та правила (формули) розрахунку параметрів моделі ОП;

3) необхідно задавати правила перегляду параметрів моделі при зміні окремих електричних параметрів ОП, які забезпечують незмінні інші параметри;

4) під час розрахунку параметрів допускається використання чисельних методів розрахунку (трансцендентних виражень, систем рівнянь і т.п.), якщо цей розрахунок забезпечено розробленим програмним забезпеченням;

5) допускається уточнення окремих параметрів моделі за допомогою багатоваріантного аналізу на програмі АСХП.

3.3. Під час розроблення методик для автоматизованого розрахунку параметрів моделей ОП необхідно враховувати такі вимоги та допущення:

1) необхідно визначити спосіб (способи) одержання початкових електричних параметрів ОП;

2) необхідно визначити алгоритми складання та рішення рівнянь відносно параметрів моделей;

3) допускається уточнення окремих параметрів моделей за допомогою оптимізаційних процедур програми АСХП;

4) якщо алгоритми розрахунку параметрів моделі вимагають діалогової взаємодії з користувачем, то необхідно приводити алгоритми перерахунку параметрів моделі під час зміни окремих електричних параметрів ОП, що забезпечують незмінність інших параметрів.

Опис універсальної нелінійної моделі ОП

1. Еквівалентна схема універсальної нелінійної моделі ОП наведена на рис.1. Вона складається із вхідного, проміжного та вихідного каскадів.

Вхідний каскад моделює вхідні характеристики ОП та коефіцієнт підсилення диференціального каскаду ОП. Опір $R1$ і $R2$ є еквівалентом навантаження вхідного каскаду ОП. Струм через транзистори $VT1$, $VT2$ задає генератор стабільного струму (ГСС). Елементи $R3$ і $C2$ являються відповідно вихідним опором і ємністю цього ГСС. Опір $R3$ визначає коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, а величина ємності $C1$ визначає другий полюс амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

Елементи проміжного каскаду виконують такі функції:

- 1) Формують повний вихідний сигнал диференціального каскаду (джерело струму $J2$);
- 2) моделюють струм опорного ГСС (джерело струму $J3$);

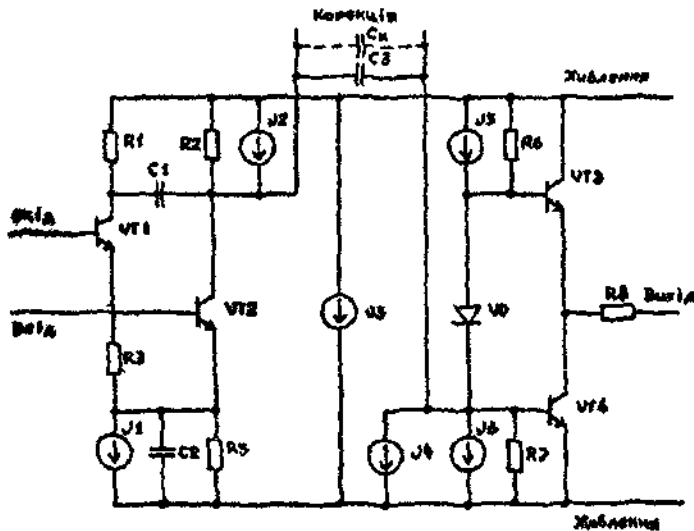


Рис. 1

3) моделюють коефіцієнт підсилення проміжного каскаду ОП (джерело струму J_4 , J_5 і J_6 , опори R_6 і R_7);

4) формують частотну характеристику (ємність C_3 та опір R_2 для ОП з внутрішньою корекцією або C_3 , R_2 та ємність зовнішньої корекції C_k для ОП із зовнішньою корекцією);

5) задають напругу зміщення транзисторам вихідного каскаду (діод VD).

Транзистори VT3, VT4 моделюють вихідні характеристики ОП. Опір R_8 обмежує максимальний вихідний струм ОУ.

2. Система рівнянь моделі об'єднує рівняння та системи рівнянь, що описують елементи еквівалентної схеми ОП.

2.1. У систему рівнянь моделі транзисторів VT3 та VT4 входять такі формули:

$$I_{эд} = I_{тэ} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{э}}{m_{тэ} T_{э}}\right) - 1 \right]; \quad (1)$$

$$I_{кд} = I_{тк} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{к}}{m_{тк} T_{к}}\right) - 1 \right]; \quad (2)$$

$$I_{э} = I_{эд} + I_{п}; \quad (3)$$

$$I_{к} = I_{кд} - I_{п}; \quad (4)$$

$$I_{п} = B_{п} \cdot I_{эд} - B_{і} \cdot I_{кд}, \quad (5)$$

де $I_{эд}$, $I_{кд}$ — струми рекомбінації носіїв, інжектованих із емітера та колектора відповідно;

$I_{тэ}$, $I_{тк}$ — теплові струми емітерного та колекторного переходів відповідно;

$U_{э}$, $U_{к}$ — напруги на емітерному та колекторному переходах відповідно;

$m_{тэ}$, $m_{тк}$ — модифіковані температурні потенціали емітерного та колекторного переходів відповідно;

$I_{э}$, $I_{к}$ — емітерний та колекторний струми відповідно;

$I_{п}$ — струм переносу;

$B_{п}$, $B_{і}$ — нормальний та зворотний коефіцієнти передачі струму в схемі із спільним емітером.

2.2. У систему рівнянь моделі транзисторів VT1 і VT2 входять такі формули:

$$I_{эд} = I_{тэ} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{э}}{m_{тэ} T_{э}}\right) - 1 \right]; \quad (6)$$

$$I_{п} = B_{п} \cdot I_{эд}; \quad (7)$$

$$I_{э} = I_{эд} + I_{п}; \quad (8)$$

$$I_{к} = -I_{п}. \quad (9)$$

2.3. Система рівнянь ГСС має вигляд:

$$I_{J1} = \alpha_1 \cdot I_{J3} ; \quad (10)$$

$$I_{J5} = \alpha_5 \cdot I_{J3} ; \quad (11)$$

$$I_{J6} = \alpha_6 \cdot I_{J3} ; \quad (12)$$

де $I_{J1}, I_{J3}, I_{J5}, I_{J6}$ — струми відповідного ГСС;

$\alpha_1, \alpha_5, \alpha_6$ — параметри, які задають коефіцієнти передачі струму.

2.4. Величина струму залежного джерела $J2$ пропорційна величині напруги на опорі $R1$:

$$I_{J2} = \alpha_2 \cdot U_{R1} , \quad (13)$$

де α_2 — параметр, який має розмірність провідності.

2.5. Рівняння, що описує джерело струму $J4$, має вигляд:

$$I_{J4} = \begin{cases} \alpha_4 \cdot U_{R2} & \text{при } \alpha_4 \cdot U_{R2} \leq I_{J5} ; \\ I_{J5} & \text{при } \alpha_4 \cdot U_{R2} > I_{J5} , \end{cases} \quad (14)$$

де α_4 — параметр, що має розмірність провідності;

U_{R2} — напруга на опорі $R2$.

2.6. Рівняння, що описує струм діода VD , має вигляд:

$$I_d = I_{тд} \cdot \left[\exp \left(\frac{U_d}{m_{тд} \cdot U_T} \right) - 1 \right] , \quad (15)$$

де I_t — тепловий струм діода;

U_d — напруга на діоді;

$m_{тд}$ — модифікований температурний потенціал діода.

2.7. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) джерела струму $J3$ задається табличною функцією.

3. У набір параметрів моделі входять: $R1, R2, R3, R5, R6, R7, R8, СВХ, C1, C2, C3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, m_{тэ1}, I_{тэ1}, B_{п1}, m_{тэ2}, I_{тэ2}, B_{п2}, m_{тк2}, m_{тэ3}, I_{тк3}, I_{тэ3}, B_{п3}, B_{т3}, m_{тк4}, m_{тэ4}, I_{тк4}, I_{тэ4}, B_{п4}, B_{т4}, m_{тд}, I_{тд}$, а також координати точок ВАХ джерела струму $J3$.

4. Значення параметрів нелінійних моделей ОП мікросхем серій 140, 153, 743 наведені в табл. 1, 2, а координати точок ВАХ джерела струму $J3$ наведені в табл. 3.

Таблиця 1

Позначення елемента	Позначення параметра моделі	Типономінал ІМС, що моделюється		
		140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7
		Значення параметра моделі		
<i>R1</i>	<i>R1</i> , кОм	177,70	177,00	530,00
<i>R2</i>	<i>R2</i> , кОм	177,70	177,00	530,00
<i>R3</i>	<i>R3</i> , Ом	45,00	112,00	110,00
<i>R5</i>	<i>R5</i> , МОм	1,00	1,00	2,50
<i>R6</i>	<i>R6</i> , кОм	100,00	100,00	80,00
<i>R7</i>	<i>R7</i> , кОм	100,00	100,00	80,00
<i>R8</i>	<i>R8</i> , Ом	50,00	50,00	30,00
<i>C1</i>	<i>C1</i> , пФ	0,45	0,45	0,20
<i>C2</i>	<i>C2</i> , пФ	1,00	1,00	3,00
<i>C3</i>	<i>C3</i> , пФ	30,00	30,00	30,00
<i>J1</i>	<i>a1</i>	$14,70 \cdot 10^{-2}$	$13,80 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$
<i>J2</i>	<i>a2</i> , мСм	$56,27 \cdot 10^{-4}$	$56,27 \cdot 10^{-4}$	$18,86 \cdot 10^{-4}$
<i>J4</i>	<i>a4</i> , мСм	34,84	28,00	32,90
<i>J5</i>	<i>a5</i>	0,67	0,67	0,75
<i>J6</i>	<i>a6</i>	0,67	0,67	0,75
<i>VT1</i>	<i>mφтэ1</i> , мВ	118,00	118,00	48,00
	<i>Ітэ1</i> , мА	$9,99 \cdot 10^{-13}$	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$1,50 \cdot 10^{-11}$
	<i>Вл1</i>	2000,00	1474,00	150,00
<i>VT2</i>	<i>mφтэ2</i> , мВ	118,00	118,00	48,00
	<i>Ітэ2</i> , мА	$7,78 \cdot 10^{-13}$	$7,55 \cdot 10^{-13}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	<i>Вл2</i>	2571,00	1953,00	225,00
<i>VT3</i>	<i>mφтк3</i> , мВ	31,00	31,00	26,00
	<i>mφтэ3</i> , мВ	99,00	99,00	48,00
	<i>Ітк3</i> , мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
	<i>Ітэ3</i> , мА	$6,75 \cdot 10^{-9}$	$6,75 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	<i>Вл3</i>	200,00	200,00	570,00
	<i>Ві3</i>	20,00	20,00	$0,60 \cdot 10^{-4}$

Закінчення табл. 1

Позначення елемента	Позначення параметра моделі	Типономінал ІМС, що моделюється		
		140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7
		Значення параметра моделі		
VT4	$t_{рТК4}$, мВ	31,00	31,00	20,00
	$t_{рТЭ4}$, мВ	99,00	99,00	48,00
	$I_{ТК4}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
	$I_{ТЭ4}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	$V_{п4}$	200,00	200,00	570,00
	$V_{г4}$	20,00	20,00	$0,60 \cdot 10^{-4}$
VD	$t_{рТД}$, мВ	132,00	132,00	71,00
	$I_{гД}$, мА	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$

Таблиця 2

Позначення елемента	Позначення параметра моделі	Типономінал ІМС, що моделюється		
		140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
		Значення параметра моделі		
<i>R1</i>	<i>R1</i> , кОм	20,00	780,00	780,00
<i>R2</i>	<i>R2</i> , кОм	20,00	780,00	780,00
<i>R3</i>	<i>R3</i> , Ом	190,00	200,00	108,00
<i>R5</i>	<i>R5</i> , МОм	20,00	10,00	10,00
<i>R6</i>	<i>R6</i> , кОм	800,00	150,00	150,00
<i>R7</i>	<i>R7</i> , кОм	800,00	150,00	150,00
<i>R8</i>	<i>R8</i> , Ом	300,00	50,00	50,00
<i>C1</i>	<i>C1</i> , пФ	3,00	0,25	0,25
<i>C2</i>	<i>C2</i> , пФ	3,00	7,00	7,00
<i>C3</i>	<i>C3</i> , пФ	0,50	1,00	1,00
<i>J1</i>	<i>a1</i>	0,09	$4,40 \cdot 10^{-2}$	$5,70 \cdot 10^{-2}$
<i>J2</i>	<i>a2</i> , мкСм	50,00	1,28	1,28
<i>J4</i>	<i>a4</i> , мСм	126,90	8,57	8,57
<i>J5</i>	<i>a5</i>	0,90	$69,77 \cdot 10^{-2}$	$81,80 \cdot 10^{-2}$
<i>J6</i>	<i>a6</i>	0,90	$69,77 \cdot 10^{-2}$	$81,80 \cdot 10^{-2}$
<i>VT1</i>	<i>t_{фгэ1}</i> , мВ	25,00	42,00	42,00
	<i>I_{тэ1}</i> , мА	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$1,25 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
	<i>V_{н1}</i>	5490,00	57,20	208,30
<i>VT2</i>	<i>t_{фгэ2}</i> , мВ	25,00	42,00	42,00
	<i>I_{тэ2}</i> , мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$1,30 \cdot 10^{-9}$	$9,16 \cdot 10^{-10}$
	<i>V_{н2}</i>	5960,00	60,60	227,30
<i>VT3</i>	<i>t_{фгк3}</i> , мВ	34,00	26,00	26,00
	<i>t_{фгэ3}</i> , мВ	58,00	31,00	31,00
	<i>I_{тк3}</i> , мА	$8,00 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-8}$	$38,47 \cdot 10^{-8}$
	<i>I_{тэ3}</i> , мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$4,68 \cdot 10^{-11}$	$2,95 \cdot 10^{-16}$
	<i>V_{н3}</i>	80,00	240,00	240,00
	<i>V_{і3}</i>	1,00	0,02	$1,84 \cdot 10^{-7}$

Позначення елемента	Позначення параметра моделі	Типономінал ІМС, що моделюється		
		140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
		Значення параметра моделі		
VT4	$t_{\text{фтк4}}$, мВ	29,00	26,00	26,00
	$t_{\text{фтэ4}}$, мВ	58,00	62,00	62,00
	$I_{\text{тх4}}$, мА	$8,00 \cdot 10^{-10}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,80 \cdot 10^{-8}$
	$I_{\text{тэ4}}$, мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$2,47 \cdot 10^{-11}$	$9,02 \cdot 10^{-10}$
	$B_{\text{п4}}$	80,00	240,00	240,00
	$B_{\text{і4}}$	1,00	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
VD	$t_{\text{рТД}}$, мВ	94,00	62,00	62,00
	$I_{\text{ТД}}$, мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$7,17 \cdot 10^{-14}$	$2,30 \cdot 10^{-17}$

Таблиця 3

Напруга на джерелі ІЗ (U _{ІЗ}), В	Типономінал ІМС, що моделюється					
	140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7	140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
	Значення струму джерела ІЗ моделі (I _{ІЗ}), мА					
4	0	0	0	0	0,280	0,1500
6	0	0	0	60,0	0,420	0,2250
8	0,170	0,090	0,15	64,0	0,560	0,3000
10	0,340	0,180	0,30	68,0	0,560	0,3027
14	0,377	0,288	0,43	71,6	0,506	0,3081
20	0,432	0,450	0,58	77,0	0,460	0,3163
24	0,470	0,485	0,63	78,2	0,448	0,3218
30	0,522	0,552	0,70	80,0	0,430	0,3300
34	—	—	0,72	—	—	—
35	0,521	0,541	0	80,4	0,425	0,3370
40	0,520	0,530	0	80,8	0,420	0,3440
41	0	0	0	0	0	0

**Методика визначення параметрів універсальної
нелінійної моделі ОП**

1. Для розрахунку параметрів моделі необхідно визначити струми ГСС вхідного, проміжного та вихідного каскадів моделі.

Струм ГСС вхідного каскаду J1 визначають за формулою:

$$I_{J1} = SR \cdot C, \quad (16)$$

де SR — максимальна швидкість наростання вихідної напруги ОП (ОП включено як інвертуючий повторювач);

$C = C_k$ — ємність для ОП із зовнішньою корекцією;

$C = C_3$ — ємність для ОП із внутрішньою корекцією.

Струми ГСС проміжного каскаду (J3) та вихідного каскаду (J5, J6) обчислюють за електричною принципіальною схемою ГСС. Для типової схеми ГСС, яку наведено на рис. 2а, струм обчислюють за формулою (17), для схеми — рис. 2б — за формулою (18), для схеми — рис. 2в — за формулою (19).

$$I = \frac{E_n - U_{\beta 31}}{K \cdot R_1}; \quad (17)$$

$$I = I_1 \cdot \frac{R_1}{R_3}; \quad (18)$$

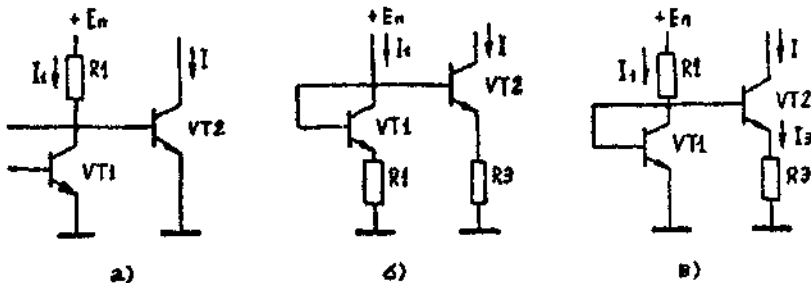


Рис. 2

$$I = \frac{m_{\text{фт}}}{R_3} \cdot \ln \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{бэ1}}}{R_1 \cdot I_1}, \quad (19)$$

де $U_{\text{бэ1}}$ — напруга база-емітер транзистора VT1;

K — відношення площ емітерних областей транзисторів VT1 та VT2;

$m_{\text{фт}}$ — модифікований температурний потенціал.

2. Значення ємності $C_{\text{вх}}$ моделі повинен дорівнювати значенню вхідної ємності ОП (C_i).

3. Значення опору R_8 моделі повинен дорівнювати опору, що обмежує максимальний вихідний струм ОП.

4. Значення параметрів моделі α_1 , α_5 , α_6 обчислюють за формулами:

$$\alpha_1 = \frac{U_1}{U_3}; \quad (20)$$

$$\alpha_5 = \alpha_6 = \frac{U_5}{U_3}; \quad (21)$$

5. Значення опорів моделі R_5 , R_6 , R_7 обчислюють за формулами:

$$R_5 = \frac{U_a}{U_5}; \quad (22)$$

$$R_6 = \frac{U_a}{U_6}; \quad (23)$$

$$R_7 = \frac{U_a}{U_7}; \quad (24)$$

де U_a — напруга Ерлі;

6. Значення параметрів B_{n1} , B_{n2} обчислюють за формулами:

$$B_{n1} = \frac{0,5 \cdot U_1}{I_{\text{ав}} + 0,5 \cdot I_{\text{іо}}}; \quad (25)$$

$$B_{n2} = \frac{0,5 \cdot U_1}{I_{\text{ав}} - 0,5 \cdot I_{\text{іо}}}. \quad (26)$$

де $I_{\text{ав}}$ — середній вхідний струм ОП;

$I_{\text{іо}}$ — різниця вхідних струмів ОП.

7. Значення параметрів $m_{\text{фтэ1}}$, $m_{\text{фтэ2}}$ обчислюють за формулою:

$$m_{\text{фтэ1}} = m_{\text{фтэ2}} = \frac{U_1 \cdot R_i}{2(B_{n1} + B_{n2})}, \quad (27)$$

де R_i — вхідний опір ОП.

8. Значення опору R_3 моделі обчислюють за формулою:

$$R_3 = 2 \cdot R_5 \cdot 10^{\frac{K_{\text{смф}}}{20}}, \quad (28)$$

де $K_{\text{смф}}$ — коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг ОП.

9. Значення параметрів $I_{т\alpha 1}$, $I_{т\alpha 2}$ вибирають рівними типовим значенням параметрів інтегральних транзисторів (в межах 10^{-9} — 10^{-11} мА), а їх відношення обчислюють за формулою:

$$\frac{I_{т\alpha 1}}{I_{т\alpha 2}} = \exp(U_{i0} - 0,5 \cdot \Pi 1 \cdot R_3). \quad (29)$$

де U_{i0} — напруга зміщення нуля ОП.

10. Значення опорів R_1 , R_2 обчислюють за формулою:

$$R_1 = R_2 = \frac{2 \cdot A_{u1} \cdot m_{т\alpha 1}}{\Pi 1}, \quad (30)$$

де A_{u1} — коефіцієнт підсилення напруги першого каскаду ОП.

11. Значення ємності C_2 моделі обчислюють за формулою:

$$C_2 = \Pi 1 \left| \frac{1}{SR^+} - \frac{1}{SR^-} \right|, \quad (31)$$

де SR^+ , SR^- — максимальна швидкість наростання позитивної та негативної вихідних напруг ОП відповідно.

12. Значення ємності C_1 моделі обчислюють за формулою:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{n2} \cdot R_2}, \quad (32)$$

де f_{n2} — частота другого полюса АЧХ ОП.

13. Значення ємності C_3 моделі для ОП із зовнішньою корекцією обчислюють за формулою:

$$C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{n1} \cdot R_2 \cdot A_{u2}}, \quad (33)$$

де f_{n1} — частота першого полюса АЧХ ОП без кіл частотної корекції;

A_{u2} — коефіцієнт підсилення напруги другого каскаду ОП.

Для ОП з внутрішньою корекцією значення ємності C_3 дорівнює значенню внутрішньої коректуючої ємності ОП.

14. Значення параметра α_2 моделі обчислюють за формулою:

$$\alpha_2 = \frac{1}{R_1}. \quad (34)$$

15. Значення параметрів $I_{т\alpha 3}$, $I_{т\alpha 4}$ вибирають різними типовим значенням в границях (10^{-9} — 10^{-11}) мА.

16. Значення параметрів $m_{т\alpha 3}$, $m_{т\alpha 4}$ вибирають однаковими в границях (1 — 1,7) · 26 мВ.

17. Значення параметрів $m_{т\alpha 3}$, $m_{т\alpha 4}$ обчислюють за формулами:

$$m_{т\alpha 3} = n \cdot m_{т\alpha 3}; \quad (35)$$

$$m_{т\alpha 4} = n \cdot m_{т\alpha 4}; \quad (36)$$

де n — кількість транзисторів, об'єднаних у складовий транзистор вихідного каскаду ОУ.

18. Значення параметрів B_{n3} , B_{n4} моделі обчислюють за формулою:

$$B_{n3} = B_{n4} = \frac{R_7 \cdot R_6 \cdot (R_0 - R_8)}{R_7 + R_6}, \quad (37)$$

де R_0 — вихідний опір ОП.

19. Для визначення параметрів $I_{тк3}$, $I_{тк4}$, B_{u13} , B_{u14} використовують характеристику $U_{outx} = f(R_n)$ ОП, за допомогою якої визначають струм колектора та напругу колектор-емітер транзисторів вихідного каскаду при двох різних значеннях опору навантаження.

Потім складають систему рівнянь відносно змінних $I_{тк3}$, B_{u3} , $I_{тк4}$, B_{u4} і розв'язують її ітераційним методом.

20. Значення параметра $m_{тгд}$ обчислюють за формулою:

$$m_{тгд} = \frac{2 \cdot m_{тг3} \cdot I_n \cdot \frac{I_{cc} - U_1 - U_3 - U_5 - I_{R6}}{B_{n3} \cdot I_{тк3}}}{I_n \cdot \frac{U_3 + I_{R6}}{I_{тк4}}}, \quad (38)$$

де I_{cc} — струм споживання ОП.

21. Значення параметра α_4 обчислюють за формулою:

$$\alpha_4 = \frac{A_{u2} \cdot \left(\frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} + B_{n3} \cdot R_n \right)}{\frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} \cdot B_{n3} \cdot R_n}, \quad (39)$$

де R_n — опір навантаження в схемі вимірювання коефіцієнта підсилення ОП.

Уточнення значень параметрів моделі проводять у процесі її випробування.

Опис лінійної моделі ОП

1. Еквівалентну схему лінійної моделі ОП наведено на рис. 3. Вона складається із вхідного каскаду, трьох інтегровальних ланцюгів, вихідного каскаду та ланцюга живлення.

Джерела струму $J1$ і $J2$ задають середній вхідний струм та різницю вхідних струмів ОП. Елементи $R1$ та $C1$ моделюють вхідний опір і вхідну ємність ОП. Джерела струму $J3, J4, J5$ разом з опором $R2$ визначають в моделі напругу зміщення нуля, коефіцієнт впливу нестабільності джерел живлення на напругу зміщення нуля та коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг. Взаємна електрична провідність джерел струму $J6, J7, J8$ і опоры $R3, R5, R8$ формують статичний коефіцієнт підсилення напруги ОП, а три інтегровальні ланцюги моделюють його частотну характеристику. Крім того, опір $R8$ є вихідним опором ОП. Струми, які протікають через опір $R6, R7$, є статичними струмами споживання ОП.

2. Формули для визначення значення струму джерел лінійної моделі мають такий вигляд:

$$I_{J1} = I_{iav} + 0,5 \cdot I_{io} ; \quad (40)$$

$$I_{J2} = I_{iav} - 0,5 \cdot I_{io} ; \quad (41)$$

$$I_{J3} = \frac{U_{io}}{R2} ; \quad (42)$$

$$I_{J4} = \frac{1}{R2} (K^- \cdot svR \cdot UR6 - K^+ \cdot svR \cdot UR7) ; \quad (43)$$

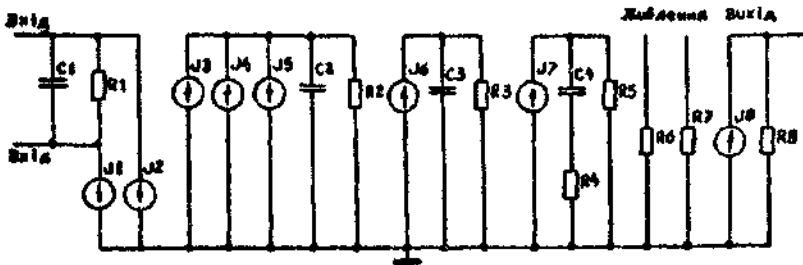


Рис. 3

$$UJ5 = \frac{1}{R2} [UJ1 - (1 + 10^{-KcmR}) \cdot UJ2] ; \quad (44)$$

$$UJ6 = \frac{1}{R3} \cdot Au \cdot UR2 ; \quad (45)$$

$$UJ7 = \frac{1}{R5} \cdot UR3 ; \quad (46)$$

$$UJ8 = Ao \cdot UR5 , \quad (47)$$

де I_{lav} — середній вхідний струм ОП;

I_{io} — різниця вхідних струмів;

U_{io} — напруга зміщення нуля;

K^{svR} , K^{svR} — коефіцієнти впливу нестабільності позитивного та негативного джерел живлення;

K_{cmR} — коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг;

A_u — коефіцієнт підсилення напруги ОП;

A_o — коефіцієнт підсилення напруги вихідного каскаду;

$UJ1$, $UJ2$, $UR2$, $UR3$, $UR5$, $UR6$, $UR7$ — напруги на відповідних елементах.

3. У набір параметрів лінійної моделі ОП входять $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, $R6$, $R7$, $R8$, $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, I_{lav} , I_{io} , U_{io} , K^{svR} , K_{cmR} , A_u , A_o .

4. Значення параметрів лінійних моделей ОП мікросхем серій 140, 153, 740 наведені в табл. 4 та 5. Для ОП із зовнішньою корекцією значення параметрів наведені для типових величин ємностей корекції, згідно із технічними умовами.

Таблиця 4

Позначення параметра моделі ОП	Типові значення параметрів моделі ОП				
	140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7	140УД8А	140УД8Б
	Значення параметра моделі ОП				
$R1, \text{МОм}$	1,00	2,00	0,40	1000,00	1000,00
$R2, \text{кОм}$	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$R3, \text{МОм}$	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$R4, \text{кОм}$	—	—	—	—	—
$R5, \text{кОм}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$R6, R7, \text{кОм}$	5,36	5,36	5,36	3,00	3,00
$R8, \text{Ом}$	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
$C1, \text{пФ}$	6,00	6,00	4,00	4,00	4,00
$C2, \text{пФ}$	13,00	13,00	13,00	12,00	12,00
$C3, \text{нФ}$	1,00	0,79	0,99	0,79	0,31
$C4, \text{пФ}$	—	—	—	—	—
$U_{io}, \text{мВ}$	5,00	8,00	4,00	20,00	20,00
$I_{lav}, \text{нА}$	30,00	43,00	200,00	0,20	0,20
$I_{io}, \text{нА}$	10,00	15,00	50,00	0,15	0,15
L_o	3,84	3,84	3,84	3,84	-3,84
K_{cmR}	80,00	70,00	70,00	64,00	64,00
$K_{svR}, \frac{\text{мкВ}}{\text{В}}$	200,00	200,00	150,00	100,00	100,00
A_u	70000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Таблиця 5

Позначення параметра моделі ОП	Тилономінальна моделюємої ІМС				
	140УД14	153УД2, 740УД5-1			153УД6
	Значення параметра моделі ОП при ємності корекціїГ				
	Ск=30 пФ	Ск=30 пФ	Ск=0	Ск1=30 пФ Ск2=300 пФ	Ск=30 пФ
$R1, \text{МОм}$	30,00	0,30	0,30	0,30	0,60
$R2, \text{кОм}$	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$R3, \text{МОм}$	10,00	10,00	10,00	100,00	10,00
$R4, \text{МОм}$	—	—	—	4,00	—
$R5, \text{кОм}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$R6, R7, \text{кОм}$	25,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$R8, \text{кОм}$	5,00	0,30	0,30	0,30	0,30
$C1, \text{пФ}$	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
$C2, \text{пФ}$	17,00	13,00	30,00	500,00	13,00
$C3, \text{пФ}$	2600,00	790,00	16,00	5,00	790,00
$C4, \text{пФ}$	—	—	15,00	15,00	—
$U_{io}, \text{мВ}$	2,00	5,00	5,00	5,00	2,00
$I_{lav}, \text{нА}$	2,00	500,00	500,00	500,00	75,00
$I_{io}, \text{нА}$	0,20	200,00	200,00	200,00	10,00
A_o	0,30	3,84	3,84	3,84	3,84
K_{cmR}	85,00	70,00	70,00	70,00	80,00
$K_{svR}, \frac{\text{мкВ}}{\text{В}}$	100,00	200,00	200,00	200,00	200,00
A_u	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Методика визначення параметрів лінійної моделі ОП

1. Значення параметрів $R1$, $C1$, $R8$ у моделі дорівнюють відповідно значенням вхідного опору, вхідної ємності та вихідного опору ОП.

2. Значення параметра A_0 обчислюють за формулою:

$$A_0 = \frac{R8 + Rn}{R8 \cdot Rn}, \quad (48)$$

де Rn — опір навантаження у схемі виміру коефіцієнта підсилення напруги.

3. Значення опорів $R6$, $R7$ обчислюють за формулою:

$$R6 = R7 = \frac{E_n}{I_{cc}}, \quad (49)$$

де E_n — напруга джерел живлення ОП.

4. Значення струму джерел $J1$ — $J8$ обчислюють за формулами (40)—(47).

5. Значення параметрів $R2$ — $R5$, $C2$ — $C4$ знаходять із АЧХ ОП. У зв'язку з тим, що частоту полюсів характеристики в моделі визначають постійні часу відповідних інтегровальних ланцюгів, то значення параметрів $R2$, $R3$, $R5$ можна задати довільно, а значення інших параметрів обчислити за такими формулами:

$$C1 = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot fn1}; \quad (50)$$

$$C2 = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot fn2}; \quad (51)$$

$$C3 = \frac{1}{2\pi \cdot R3 \cdot fn4}; \quad (52)$$

$$R4 = \frac{1}{2\pi \cdot C2 \cdot fn3}; \quad (53)$$

де $fn1$, $fn2$, $fn3$, $fn4$ — частоти полюсів АЧХ ОП.

ІНФОРМАЦІЙНІ ДАНІ

1. РОЗРОБЛЕНО І ВНЕСЕНО МІНМАШПРОМ, КВ «Електроавтоматика»

РОЗРОБНИКИ: А.І.Лугін (керівник теми); А.К.Тімовський; С.В.Панкєєв; Т.С.Кланова; В.В.Романов

2. ЗАТВЕРДЖЕНО І ВВЕДЕНО В ДІЮ наказом Держстандарту України № 163 від 29 червня 1994 р.

3. ВВЕДЕНО ВПЕРШЕ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ УКРАИНЫ

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАЦИОННЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ****Общие требования****ДСТУ
2638—94****СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ****ПОВУДОВА МОДЕЛЕЙ ОПЕРАЦІЙНИХ
ПІДСИЛЮВАЧІВ****Загальні вимоги****SYSTEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN****DEVELOPMENT OF OPERATIONAL
AMPLIFIER'S MODELS****General requirements**

Дата введення 01.07.94

Настоящий стандарт распространяется на математические модели интегральных микросхем (ИМС) операционных усилителей (ОУ), применяемых в системах автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и устанавливает единые требования к моделям СУ и единые наборы параметров моделей ОУ.

Стандарт предназначен для разработчиков РЭА, использующих автоматизированные системы схемотехнического проектирования (АСХП), а также разработчиков алгоритмов и программ этих систем.

1. Общие положения

1.1. В зависимости от назначения и требований, предъявляемых к моделям ОУ, разрабатываются модели, которые классифицируются на следующие основные типы:

- 1) линейные модели для анализа схем в частотной области;
- 2) линейные модели для анализа статических погрешностей в схеме;
- 3) нелинейные статические модели для анализа низкочастотных схем в режиме большого сигнала;
- 4) нелинейные динамические модели для анализа схем во всех режимах.

1.2. Модели любого типа делятся на модели универсального и частного применения.

Как правило, в моделях частного применения не учитываются зависимости параметров от режима работы, а использование их допускается в конкретно оговоренных режимах или схемах применения.

Так, частные линейные модели для анализа схем в частотной области часто рассчитаны на определенный тип корректирующих звеньев или на ограниченный диапазон частот входного сигнала. Частные линейные модели для анализа статических погрешностей рассчитываются на определенные значения питающих напряжений и тип звеньев балансировки. Наиболее полные нелинейные динамические модели позволяют анализировать любые схемы применения ОУ, но, как правило, занимают много памяти и времени электронно-вычислительных машин (ЭВМ), а также имеют сложную методику определения параметров.

1.3. В программах АСХП целесообразно иметь универсальную нелинейную динамическую модель ОУ и ряд частных моделей для конкретных, часто используемых областей применения.

2. Принципы построения моделей ОУ

2.1. Требования к нелинейным моделям ОУ

2.1.1. Универсальная нелинейная динамическая модель ОУ разрабатывается для анализа интегральных ОУ, значения электрических параметров которых устанавливаются в нормативной документации (НД), и должна обеспечивать возможность анализа схем ОУ, как при номинальных так и при предельно-допустимых значениях электрических параметров.

2.1.2. Модель должна иметь параметры, которые рассчитываются по электрическим характеристикам ОУ, приведенным в НД. Допус-

кается рассчитывать параметры модели по данным измерения электрических характеристик ОУ относительно его внешних выводов.

2.1.3. Модель должна отражать электрические свойства ОУ при любых допустимых значениях параметров, указанных в технических условиях (ТУ) на них, только за счет изменения параметров модели.

2.1.4. Модель должна отражать зависимость электрических параметров ОУ от электрических режимов на его выводах в диапазоне допустимых изменений (допустимые изменения ограничиваются предельно-допустимыми режимами по ТУ).

2.1.5. Модель должна учитывать следующие электрические параметры ОУ:

- 1) средний входной ток (I_{iav});
- 2) разность входных токов (I_{io});
- 3) напряжение смещения нуля (U_{io});
- 4) коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля (K_{svk});
- 5) входное сопротивление (R_i);
- 6) коэффициент ослабления синфазных входных напряжений ($K_{спр}$);
- 7) коэффициент усиления напряжения (A_u);
- 8) ток потребления (I_{cc});
- 9) выходное сопротивление (R_o);
- 10) максимальное выходное напряжение ($U_o \text{ max}$);
- 11) входную емкость (C_i);
- 12) частоту единичного усиления (f_1);
- 13) частоту среза (f_{co});
- 14) максимальную скорость нарастания выходного напряжения (SR).

2.1.6. Модель должна учитывать зависимость фазового сдвига и модуля коэффициента усиления напряжения от частоты входного сигнала.

2.2. Требования к линейным моделям ОУ

2.2.1. Частная линейная модель ОУ для анализа схем в частотной области и статических погрешностей разрабатывается для интегральных ОУ, электрические параметры которых устанавливаются в НД.

Модель должна обеспечивать возможность анализа схем при номинальном значении напряжений источников питания и при номинальных или предельно-допустимых значениях электрических параметров ОУ.

2.2.2. Модель должна иметь параметры, которые рассчитываются по электрическим параметрам ОУ, приведенным в ТУ, и справочным данным, приводимым в НД. Допускается рассчитывать параметры

модели по данным измерения электрических характеристик относительно внешних выводов ОУ.

2.2.3. Модель должна отражать электрические свойства ОУ при любых допустимых значениях параметров, указанных в ТУ на них, только за счет изменения параметров модели.

2.2.4. Модель должна учитывать следующие электрические параметры ОУ:

- 1) средний входной ток (I_{iav});
- 2) разность входных токов (I_{io});
- 3) напряжение смещения нуля (U_{io});
- 4) коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля (K_{svR});
- 5) входное сопротивление (R_i);
- 6) коэффициент ослабления синфазных входных напряжений (K_{cmR});
- 7) коэффициент усиления напряжения (A_u);
- 8) выходное сопротивление (R_o);
- 9) входную емкость (C_i);
- 10) частоту единичного усиления (f_l);
- 11) частоту среза (f_{co}).

2.2.5. Модель должна учитывать зависимость фазового сдвига и модуля коэффициента усиления напряжения от частоты входного сигнала.

2.3. Методы построения моделей ОУ

2.3.1. Для построения моделей ОУ используются формальный, физический и комбинированный методы.

2.3.2. Формальным методом модель строится только по внешним электрическим параметрам и характеристикам.

2.3.3. Физическим методом модель строится на основании внутренней структуры ОУ, а ее параметры определяются по внешним электрическим параметрам и характеристикам. Под внутренней структурой ОУ необходимо понимать принципиальную электрическую схему микросхемы. Эквивалентная схема модели строится по принципиальной схеме ОУ путем подстановки на место компонента их моделей.

2.3.4. При комбинированном методе за основу модели принимается эквивалентная схема, полученная физическим методом. Параметры моделей компонента рассчитываются по электрическим параметрам ОУ. Модели компонента, которые не влияют на значения электрических параметров ОУ, из модели исключаются и заменяются (при необходимости) элементами, обеспечивающими функционирование всей модели ОУ. Если при определении параметров модели компонента возникает многозначность, то часть из этих параметров задается произвольно (желательно учитывать ти-

повые значения этих параметров), а остальные вычисляются по электрическим параметрам ОУ.

2.3.5. В качестве примера в приложении 1 приведено описание универсальной нелинейной модели ОУ с входным каскадом на биполярных транзисторах, построенной комбинированным методом. В приложении 2 приведена методика определения параметров этой модели.

В приложении 3 приведено описание линейной модели ОУ, построенной формальным методом, а в приложении 4 — методика определения ее параметров.

2.4 Базовые элементы для построения моделей ОУ

Для введения в программу АСХП моделей ОУ, программа должна иметь следующий минимальный набор базовых элементов:

- 1) электрическое сопротивление. Двухполюсник, ток которого линейно зависит от приложенного к нему напряжения;
- 2) постоянный источник тока. Двухполюсник, ток которого равен значению величины заданного параметра;
- 3) постоянный источник напряжения. Двухполюсник, напряжение на котором равно значению величины заданного параметра;
- 4) линейнозависимый источник тока. Двухполюсник, ток которого линейно зависит от напряжения на другом двухполюснике модели;
- 5) линейнозависимый источник напряжения. Двухполюсник, напряжение на котором линейно зависит от напряжения на другом двухполюснике модели;
- 6) нелинейный табличный источник тока. Двухполюсник, ток которого определяется по заданной таблице в зависимости от напряжения на другом двухполюснике модели;
- 7) постоянная емкость. Двухполюсник, ток которого определяется как произведение величины заданного параметра на скорость изменения приложенного к нему напряжения;
- 8) биполярный транзистор. Нелинейная модель биполярного транзистора;
- 9) полевой транзистор с управляющим р-п переходом. Нелинейная модель полевого транзистора с управляющим р-п переходом.

2.5 Точность и эффективность моделей ОУ

2.5.1. Модель с рассчитанными параметрами для конкретного типонаминала должна быть испытана путем моделирования на программе АСХП схем измерения электрических параметров ОУ. Для каждого параметра определяется относительная погрешность рассчитанной величины по отношению к исходной (измеренной или приведенной в НД), которую использовали для расчета параметров модели. Если погрешность не превышает 5%, то расчет параметров модели выполнен правильно.

2.5.2. При выборе моделей необходимо оценивать их точность и вычислительную эффективность.

Вычислительная эффективность состоит из двух составляющих: затрат памяти ЭВМ и затрат машинного времени.

2.5.3. Для оценки затрат памяти различными моделями выполняют моделирование тестовой схемы, состоящей только из ОУ одного типа, моделируемых одной моделью. Затраты памяти будут обратнопропорциональными максимальному количеству ОУ в этой схеме, которое анализируется программой.

2.5.4. Оценку точности и затрат машинного времени проводят на наборе тестовых схем, в который включают схемы типовых узлов РЭА, используемых конкретным пользователем.

3. Методики определения параметров ОУ

3.1. Методика определения параметров — это система правил, с помощью которых по электрическим параметрам и характеристикам ОУ получают параметры модели.

Методики определения параметров разделяются на два вида:

- 1) методики для ручного расчета параметров модели;
- 2) методики для автоматизированного расчета параметров модели.

3.2. При разработке методик для ручного определения параметров моделей ОУ необходимо учитывать следующие требования и допущения:

1) необходимо определять способ (способы) получения исходных электрических параметров ОУ;

2) необходимо задавать последовательность и правила (формулы) расчета параметров модели ОУ;

3) необходимо задавать правила пересмотра параметров модели при изменении отдельных электрических параметров ОУ, обеспечивающих неизменность остальных параметров;

4) при расчете параметров допускается использование численных методов расчета (трансцендентных выражений, систем уравнений и т.п.), если этот расчет обеспечен разработанным программным обеспечением;

5) допускается уточнение отдельных параметров модели с помощью многовариантного анализа на программе АСХП.

3.3. При разработке методик для автоматизированного расчета параметров моделей ОУ необходимо учитывать следующие требования и допущения:

1) необходимо определять способ (способы) получения исходных электрических параметров ОУ;

2) необходимо определять алгоритмы составления и решения уравнений относительно параметров моделей;

3) допускается уточнение отдельных параметров моделей с помощью оптимизационных процедур программы АСхП;

4) если алгоритмы расчета всех параметров модели требуют диалогового взаимодействия с пользователем, то необходимо приводить алгоритмы пересчета параметров модели при изменении отдельных электрических параметров ОУ, обеспечивающих неизменность остальных параметров.

Описание универсальной нелинейной модели ОУ

1. Эквивалентная схема универсальной нелинейной модели ОУ приведена на рис. 1. Она состоит из входного, промежуточного и выходного каскадов.

Входной каскад моделирует входные характеристики ОУ и коэффициент усиления дифференциального каскада ОУ. Сопротивления $R1$ и $R2$ являются эквивалентом нагрузки входного каскада ОУ. Ток через транзисторы $VT1$, $VT2$ задает генератор стабильного тока (ГСТ) $J1$. Элементы $R5$ и $C2$ являются соответственно выходным сопротивлением и емкостью этого ГСТ. Сопротивление $R3$ определяет коэффициент ослабления синфазного сигнала, а величина емкости $C1$ определяет второй полюс амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Элементы промежуточного каскада выполняют следующие функции:

1) формируют полный выходной сигнал дифференциального каскада (источник тока $J2$);

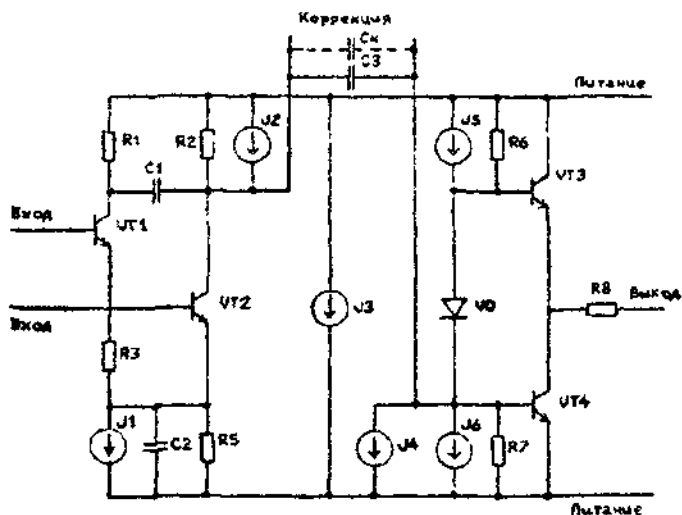


Рис. 1

2) моделируют ток опорного ГСТ (источник тока J3);

3) моделируют коэффициент усиления промежуточного каскада ОУ (источники тока J4, J5 и J6, сопротивления R6 и R7);

4) формируют частотную характеристику (емкость C3 и сопротивление R2 для ОУ с внутренней коррекцией или C3, R2 и емкость внешней коррекции Cк для ОУ с внешней коррекцией);

5) задают напряжение смещения транзисторам выходного каскада (диод VD).

Транзисторы VT3, VT4 моделируют выходные характеристики ОУ. Сопротивление R8 ограничивает максимальный выходной ток ОУ.

2. Система уравнений модели объединяет уравнения и системы уравнений, описывающие элементы эквивалентной схемы ОУ.

2.1. В систему уравнений модели транзисторов VT3 и VT4 входят следующие формулы:

$$I_{эд} = I_{тэ} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{э}}{t_{фртэ}} - 1\right) \right]; \quad (1)$$

$$I_{кд} = I_{тк} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{к}}{t_{фртк}} - 1\right) \right]; \quad (2)$$

$$I_{э} = I_{эд} + I_{п}; \quad (3)$$

$$I_{к} = I_{кд} - I_{п}; \quad (4)$$

$$I_{п} = B_{п} \cdot I_{эд} - B_{i} \cdot I_{кд}, \quad (5)$$

где $I_{эд}$, $I_{кд}$ — токи рекомбинации носителей, инжектированных из эмиттера и коллектора соответственно;

$I_{тэ}$, $I_{тк}$ — тепловые токи эмиттерного и коллекторного переходов соответственно;

$U_{э}$, $U_{к}$ — напряжения на эмиттерном и коллекторном переходе соответственно;

$t_{фртэ}$, $t_{фртк}$ — модифицированные температурные потенциалы эмиттерного и коллекторного переходов соответственно;

$I_{э}$, $I_{к}$ — эмиттерный и коллекторный токи соответственно;

$I_{п}$ — ток переноса;

$B_{п}$, B_{i} — нормальный и инверсный коэффициенты передачи тока в схеме с общим эмиттером.

2.2. В систему уравнений модели транзисторов VT1 и VT2 входят следующие формулы:

$$I_{эд} = I_{тэ} \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{э}}{t_{фртэ}} - 1\right) \right]; \quad (6)$$

$$I_{п} = B_{п} \cdot I_{эд}; \quad (7)$$

$$I_{э} = I_{эд} + I_{п}; \quad (8)$$

$$I_k = -I_n \quad (9)$$

2.3 Система уравнений ГСТ имеет вид:

$$I_{J1} = \alpha_1 \cdot I_{J3} ; \quad (10)$$

$$I_{J5} = \alpha_5 \cdot I_{J3} ; \quad (11)$$

$$I_{J6} = \alpha_6 \cdot I_{J3} , \quad (12)$$

где $I_{J1}, I_{J3}, I_{J5}, I_{J6}$ — токи соответствующего ГСТ;
 $\alpha_1, \alpha_5, \alpha_6$ — параметры, задающие коэффициенты передачи тока.
 Величина тока I_{J2} пропорциональна величине напряжения на сопротивлении R_1

$$I_{J2} = \alpha_2 \cdot U_{R1} , \quad (13)$$

где α_2 — параметр, имеющий размерность проводимости.

2.5. Уравнение, описывающее источник тока I_{J4} , имеет вид:

$$I_{J4} = \begin{cases} \alpha_4 \cdot U_{R2} & \text{при } \alpha_4 \cdot U_{R2} \leq I_{J5} ; \\ I_{J5} & \text{при } \alpha_4 \cdot U_{R2} > I_{J5} , \end{cases} \quad (14)$$

где α_4 — параметр, имеющий размерность проводимости;

U_{R2} — напряжение на сопротивлении R_2 .

2.6. Уравнение, описывающее ток диода VD, имеет вид:

$$I_d = I_{td} \cdot \left[\exp \left(\frac{U_d}{m_{фтд}} - 1 \right) \right] , \quad (15)$$

где I_{td} — тепловой ток диода;

U_d — напряжение на диоде;

$m_{фтд}$ — модифицированный температурный потенциал диода.

2.7. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) источника тока I_{J3} задана табличной функцией.

3. В набор параметров модели входят $R_1, R_2, R_3, R_5, R_6, R_7, R_8, CBX, C1, C2, C3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, m_{фтэ1}, I_{тэ1}, B_{п1}, m_{фтэ2}, I_{тэ2}, B_{п2}, m_{фтк2}, m_{фтэ3}, I_{тк3}, I_{тэ3}, B_{п3}, B_{i3}, m_{фтк4}, m_{фтэ4}, I_{тк4}, I_{тэ4}, B_{п4}, B_{i4}, m_{фтд}, I_{td}$, а также координаты точек ВАХ источника тока I_{J3} .

4. Значения параметров нелинейных моделей ОУ микросхем серий 140, 153, 743 приведены в табл. 1, 2, а координаты точек ВАХ источника тока I_{J3} приведены в табл. 3.

Таблица 1

Обозначение элемента	Обозначение параметра модели	Типономинал моделируемой ИМС		
		140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7
		Значение параметра модели		
<i>R1</i>	<i>R1</i> , кОм	177,70	177,00	530,00
<i>R2</i>	<i>R2</i> , кОм	177,70	177,00	530,00
<i>R3</i>	<i>R3</i> , Ом	45,00	112,00	110,00
<i>R5</i>	<i>R5</i> , МОм	1,00	1,00	2,50
<i>R6</i>	<i>R6</i> , кОм	100,00	100,00	80,00
<i>R7</i>	<i>R7</i> , кОм	100,00	100,00	80,00
<i>R8</i>	<i>R8</i> , Ом	50,00	50,00	30,00
<i>C1</i>	<i>C1</i> , пФ	0,45	0,45	0,20
<i>C2</i>	<i>C2</i> , пФ	1,00	1,00	3,00
<i>C3</i>	<i>C3</i> , пФ	30,00	30,00	30,00
<i>J1</i>	$\alpha 1$	$14,70 \cdot 10^{-2}$	$13,80 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$
<i>J2</i>	$\alpha 2$, мСм	$56,27 \cdot 10^{-4}$	$56,27 \cdot 10^{-4}$	$18,86 \cdot 10^{-4}$
<i>J4</i>	$\alpha 4$, мСм	34,84	28,00	32,90
<i>J5</i>	$\alpha 5$	0,67	0,67	0,75
<i>J6</i>	$\alpha 6$	0,67	0,67	0,75
<i>VT1</i>	$m\varphi t_{\alpha 1}$, мВ	118,00	118,00	48,00
	$I t_{\alpha 1}$, мА	$9,99 \cdot 10^{-13}$	$1,00 \cdot 10^{-12}$	$1,50 \cdot 10^{-11}$
	<i>Bn1</i>	2000,00	1474,00	150,00
<i>VT2</i>	$m\varphi t_{\alpha 2}$, мВ	118,00	118,00	48,00
	$I t_{\alpha 2}$, мА	$7,78 \cdot 10^{-13}$	$7,55 \cdot 10^{-13}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	<i>Bn2</i>	2571,00	1953,00	225,00
<i>VT3</i>	$m\varphi t_{\alpha 3}$, мВ	31,00	31,00	26,00
	$m\varphi t_{\beta 3}$, мВ	99,00	99,00	48,00
	$I t_{\alpha 3}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
	$I t_{\beta 3}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-9}$	$6,75 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	<i>Bn3</i>	200,00	200,00	570,00
	<i>Bi3</i>	20,00	20,00	$0,60 \cdot 10^{-4}$

Обозначение элемента	Обозначение параметра модели	Типономинал моделируемой ИМС		
		140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7
		Значение параметра модели		
VT4	$t_{\text{фТК4}}$, мВ	31,00	31,00	20,00
	$t_{\text{фТЭ4}}$, мВ	99,00	99,00	48,00
	$I_{\text{тК4}}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
	$I_{\text{тЭ4}}$, мА	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
	$B_{\text{н4}}$	200,00	200,00	570,00
	$B_{\text{л4}}$	20,00	20,00	$0,60 \cdot 10^{-2}$
VD	$t_{\text{фТД}}$, мВ	132,00	132,00	71,00
	$I_{\text{тД}}$, мА	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$1,80 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$

Таблица 2

Обозначение элемента	Обозначение параметра модели	Типономинал моделируемой ИМС		
		140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
		Значение параметра модели		
<i>R1</i>	<i>R1</i> , кОм	20,00	780,00	780,00
<i>R2</i>	<i>R2</i> , кОм	20,00	780,00	780,00
<i>R3</i>	<i>R3</i> , Ом	190,00	200,00	108,00
<i>R5</i>	<i>R5</i> , МОм	20,00	10,00	10,00
<i>R6</i>	<i>R6</i> , кОм	800,00	150,00	150,00
<i>R7</i>	<i>R7</i> , кОм	800,00	150,00	150,00
<i>R8</i>	<i>R8</i> , Ом	300,00	50,00	50,00
<i>C1</i>	<i>C1</i> , пФ	3,00	0,25	0,25
<i>C2</i>	<i>C2</i> , пФ	3,00	7,00	7,00
<i>C3</i>	<i>C3</i> , пФ	0,50	1,00	1,00
<i>J1</i>	$\alpha 1$	0,09	$4,40 \cdot 10^{-2}$	$5,70 \cdot 10^{-2}$
<i>J2</i>	$\alpha 2$, мксм	50,00	1,28	1,28
<i>J4</i>	$\alpha 4$, мсм	126,90	8,57	8,57
<i>J5</i>	$\alpha 5$	0,90	$69,77 \cdot 10^{-2}$	$81,80 \cdot 10^{-2}$
<i>J6</i>	$\alpha 6$	0,90	$69,77 \cdot 10^{-2}$	$81,80 \cdot 10^{-2}$
<i>VT1</i>	<i>mptz1</i> , мВ	25,00	42,00	42,00
	<i>Itz1</i> , мА	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$1,25 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-9}$
	<i>Bn1</i>	5490,00	57,20	208,30
<i>VT2</i>	<i>mptz2</i> , мВ	25,00	42,00	42,00
	<i>Itz2</i> , мА	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$1,30 \cdot 10^{-9}$	$9,16 \cdot 10^{-10}$
	<i>Bn2</i>	5960,00	60,60	227,30
<i>VT3</i>	<i>mptz3</i> , мВ	34,00	26,00	26,00
	<i>mptz3</i> , мВ	58,00	31,00	31,00
	<i>Itz3</i> , мА	$8,00 \cdot 10^{-10}$	$5,61 \cdot 10^{-9}$	$38,47 \cdot 10^{-8}$
	<i>Itz3</i> , мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$4,68 \cdot 10^{-11}$	$2,95 \cdot 10^{-16}$
	<i>Bn3</i>	80,00	240,00	240,00
	<i>Bi3</i>	1,00	0,02	$1,84 \cdot 10^{-7}$

Окончание табл. 2

Обозначение элемента	Обозначение параметра модели	Типономинал моделируемой ИМС		
		140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
		Значение параметра модели		
УТ4	<i>т_ртк4</i> , мВ	29,00	26,00	26,00
	<i>т_ртэ4</i> , мВ	58,00	62,00	62,00
	<i>Ітк4</i> , мА	$8,00 \cdot 10^{-10}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$
	<i>Ітэ4</i> , мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$2,47 \cdot 10^{-11}$	$9,02 \cdot 10^{-16}$
	<i>Вп4</i>	80,00	240,00	240,00
	<i>Ві4</i>	1,00	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
VD	<i>т_ртд</i> , мВ	94,00	62,00	62,00
	<i>Ітд</i> , мА	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$7,17 \cdot 10^{-14}$	$2,30 \cdot 10^{-17}$

Таблица 3

Напряже- ние на источ- нике J3 (UJ3), В	Типономинал моделируемой ИМС					
	140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7	140УД14	153УД2, 740УД5-1	153УД6
	Значение тока источника J3 модели (I _{J3}), мА					
4	0	0	0	0	0,280	0,1500
6	0	0	0	60,0	0,420	0,2250
8	0,170	0,090	0,15	64,0	0,560	0,3000
10	0,340	0,180	0,30	68,0	0,560	0,3027
14	0,377	0,288	0,43	71,6	0,506	0,3081
20	0,432	0,450	0,58	77,0	0,460	0,3163
24	0,470	0,485	0,63	78,2	0,448	0,3218
30	0,522	0,552	0,70	80,0	0,430	0,3300
34	—	—	0,72	—	—	—
35	0,521	0,541	0	80,4	0,425	0,3370
40	0,520	0,530	0	80,8	0,420	0,3440
41	0	0	0	0	0	0

**Методика определения параметров универсальной
нелинейной модели ОУ**

1. Для расчета параметров модели необходимо определить токи ГСТ входного, промежуточного и выходного каскадов модели.

Ток ГСТ входного каскада I_1 определяют по формуле:

$$I_1 = SR \cdot C, \quad (16)$$

где SR — максимальная скорость нарастания выходного напряжения ОУ (ОУ включен как инвертирующий повторитель);

$C = C_k$ — емкость для ОУ с внешней коррекцией;

$C = C_3$ — емкость для ОУ с внутренней коррекцией.

Токи ГСТ промежуточного каскада (J_3) и выходного каскада (J_5 , J_6) рассчитывают по электрической принципиальной схеме ГСТ.

Для типовой схемы ГСТ, приведенной на рис. 2а, ток рассчитывается по формуле (17); для схемы — рис. 2б — по формуле (18); для схемы — рис. 2в — по формуле (19).

$$I = \frac{E_n - U_{\phi 1}}{K \cdot R_1}; \quad (17)$$

$$I = I_1 \cdot \frac{R_1}{R_2}; \quad (18)$$

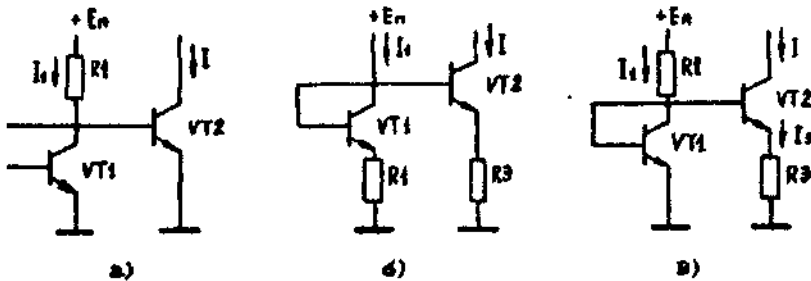


Рис. 2

$$I = \frac{m\varphi T}{R_3} \cdot \ln \frac{E_n - U_{бэ1}}{R_1 \cdot I_1}, \quad (19)$$

где $U_{бэ1}$ — напряжение база-эмиттер транзистора VT1;

K — отношение площадей эмиттерных областей транзисторов VT1 и VT2;

$m\varphi T$ — модифицированный температурный потенциал.

2. Значение емкости $C_{вх}$ модели выбирают равным значению входной емкости ОУ (C_i).

3. Значение сопротивления R_8 модели выбирают равным сопротивлению, ограничивающему максимальный выходной ток ОУ.

4. Значения параметров модели α_1 , α_5 , α_6 рассчитывают по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{U_1}{U_3}; \quad (20)$$

$$\alpha_5 = \alpha_6 = \frac{U_5}{U_5}. \quad (21)$$

Значения сопротивлений модели R_5 , R_6 , R_7 определяют по формулам:

$$R_5 = \frac{U_a}{U_5}; \quad (22)$$

$$R_6 = \frac{U_a}{U_6}; \quad (23)$$

$$R_7 = \frac{U_a}{U_7}; \quad (24)$$

где U_a — напряжение Эрли.

6. Значения параметров B_{n1} , B_{n2} определяют по формулам:

$$B_{n1} = \frac{0,5 \cdot I_1}{I_{ав} + 0,5 \cdot I_{и0}}; \quad (25)$$

$$B_{n2} = \frac{0,5 \cdot I_1}{I_{ав} - 0,5 \cdot I_{и0}}; \quad (26)$$

где $I_{ав}$ — средний входной ток ОУ;

$I_{и0}$ — разность входных токов ОУ.

7. Значения параметров $m\varphi T_{э1}$, $m\varphi T_{э2}$ рассчитывают по формуле:

$$m\varphi T_{э1} = m\varphi T_{э2} = \frac{U_1 \cdot R_1}{2 \cdot (B_{n1} + B_{n2})}, \quad (27)$$

где R_1 — входное сопротивление ОУ.

8. Значение сопротивления R_3 модели рассчитывают по формуле:

$$R_3 = 2 \cdot R_5 \cdot 10^{\frac{K_{смк}}{20}}, \quad (28)$$

где $K_{смв}$ — коэффициент ослабления синфазных входных напряжений ОУ.

9. Значения параметров $I_{тэ1}$, $I_{тэ2}$ выбирают равными типовым значениям параметров интегральных транзисторов (в пределах 10^{-9} — 10^{-11} мА), а их отношение определяют по формуле:

$$\frac{I_{тэ1}}{I_{тэ2}} = \exp(U_{и0} - 0,5 \cdot U_{I1} \cdot R_3) , \quad (29)$$

где $U_{и0}$ — напряжение смещения нуля ОУ.

10. Значения сопротивлений R_1 , R_2 определяют по формуле:

$$R_1 = R_2 = \frac{2 \cdot A_{u1} \cdot \tau_{штэ1}}{U_{I1}} , \quad (30)$$

где A_{u1} — коэффициент усиления напряжения первого каскада ОУ.

11. Значение емкости C_2 модели определяют по формуле:

$$C_2 = I_{j1} \left| \frac{1}{SR^+} - \frac{1}{SR^-} \right| , \quad (31)$$

где SR^+ , SR^- — максимальная скорость нарастания положительного и отрицательного выходных напряжений ОУ соответственно.

12. Значение емкости C_1 модели определяют по формуле:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{л2} \cdot R_2} , \quad (32)$$

где $f_{л2}$ — частота второго полюса АЧХ ОУ.

13. Значение емкости C_3 модели для ОУ с внешней коррекцией определяют по формуле:

$$C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{л1} \cdot R_2 \cdot A_{u2}} , \quad (33)$$

где $f_{л1}$ — частота первого полюса АЧХ ОУ без цепей частотной коррекции;

A_{u2} — коэффициент усиления напряжения второго каскада ОУ.

Для ОУ с внутренней коррекцией значение емкости C_3 равно значению внутренней корректирующей емкости ОУ.

14. Значение параметра α_2 модели определяют по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{1}{R_1} . \quad (34)$$

15. Значения параметров $I_{тд}$, $I_{тэ3}$, $I_{тэ4}$ выбирают равными типовым значениям в пределах (10^{-9} — 10^{-11} мА).

16. Значения параметров $\tau_{штк3}$, $\tau_{штк4}$ выбирают одинаковыми в пределах $(1-1,7) \cdot 26$ мВ.

17. Значения параметров $\tau_{штэ3}$, $\tau_{штэ4}$ рассчитывают по формулам:

$$\tau_{штэ3} = n \cdot \tau_{штк3} ; \quad (35)$$

$$\mu_{ртз4} = n \cdot \mu_{ртк4}, \quad (36)$$

где n — количество транзисторов, объединенных в составной транзистор выходного каскада ОУ.

18. Значения параметров $Bn3$, $Bn4$ модели рассчитывают по формуле:

$$Bn3 = Bn4 = \frac{R7 \cdot R6 \cdot (R0 - R8)}{R7 + R6}, \quad (37)$$

где $R0$ — выходное сопротивление ОУ.

19. Для определения параметров $I_{тк3}$, $I_{тк4}$, $Bu3$, $Bu4$ используют характеристику $I_{омах} = f(R_n)$ ОУ, по которой определяют ток коллектора и напряжение коллектор-эмиттер транзисторов выходного каскада при двух различных значениях сопротивления нагрузки.

Затем составляют систему уравнений относительно переменных $I_{тк3}$, $Bu3$, $I_{тк4}$, $Bu4$ и решают ее итерационным методом.

20. Значение параметра $\mu_{ртд}$ определяют по формуле:

$$\mu_{ртд} = \frac{2 \cdot \mu_{ртз3} \cdot \ln \frac{I_{сс} - U1 - U3 - U5 - I_{R6}}{Bn3 \cdot I_{тз3}}}{\ln \frac{U5 + I_{R6}}{I_{тд}}}, \quad (38)$$

где $I_{сс}$ — ток потребления ОУ.

21. Значение параметра $\alpha4$ определяют по формуле:

$$\alpha4 = \frac{Au2 \cdot \left(\frac{R6 \cdot R7}{R6 + R7} + Bn3 \cdot R_n \right)}{\frac{R6 \cdot R7}{R6 + R7} \cdot Bn3 \cdot R_n}, \quad (39)$$

где R_n — сопротивление нагрузки в схеме измерения коэффициента усиления ОУ.

Уточнение значений параметров модели проводят в процессе ее испытаний.

Описание линейной модели ОУ

1. Эквивалентная схема линейной модели ОУ приведена на рис. 3. Она состоит из входного каскада, трех интегрирующих звеньев, выходного каскада и звена питания.

Источники тока $J1$ и $J2$ задают средний входной ток и разность входных токов ОУ. Элементы $R1$ и $C1$ моделируют входное сопротивление и входную емкость ОУ. Источники тока $J1, J4, J5$ совместно с сопротивлением $R2$ определяют в модели напряжение смещения нуля, коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения нуля и коэффициент ослабления синфазных входных напряжений. Взаимная электрическая проводимость источников тока $J6, J7, J8$ и сопротивления $R3, R5, R8$ формируют статический коэффициент усиления напряжения ОУ, а три интегрирующие звена моделируют его частотную характеристику. Кроме того, сопротивление $R8$ является выходным сопротивлением ОУ. Протекающие через сопротивления $R6, R7$ токи являются статическими токами потребления ОУ.

2. Формулы для определения значения тока источников линейной модели имеют вид:

$$I_{J1} = I_{iav} + 0,5 \cdot I_{io} ; \quad (40)$$

$$I_{J2} = I_{iav} - 0,5 \cdot I_{io} ; \quad (41)$$

$$I_{J3} = \frac{U_{io}}{R2} ; \quad (42)$$

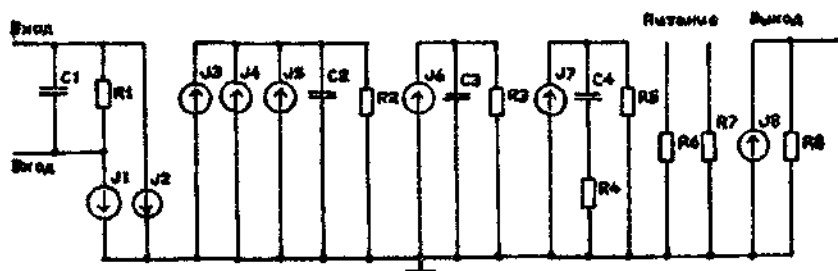


Рис. 3

$$U_4 = \frac{1}{R_2} (K^+_{svR} \cdot UR_6 - K^-_{svR} \cdot UR_7) ; \quad (43)$$

$$U_5 = \frac{1}{R_2} [U_{J1} - (1 + 10^{-K_{cmR}}) \cdot U_{J2}] ; \quad (44)$$

$$U_6 = \frac{1}{R_3} \cdot A_u \cdot UR_2 ; \quad (45)$$

$$U_7 = \frac{1}{R_5} \cdot UR_3 ; \quad (46)$$

$$U_8 = A_o \cdot UR_5 , \quad (47)$$

где I_{av} — средний входной ток ОУ;

I_{io} — разность входных токов;

U_{io} — напряжение смещения нуля;

K^+_{svR} , K^-_{svR} — коэффициенты влияния нестабильности положительных и отрицательных источников питания;

K_{cmR} — коэффициент ослабления синфазных входных напряжений;

A_u — коэффициент усиления напряжения ОУ;

A_o — коэффициент усиления напряжения выходного каскада;

U_{J1} , U_{J2} , UR_2 , UR_3 , UR_5 , UR_6 , UR_7 — напряжения на соответствующих элементах.

3. В набор параметров линейной модели ОУ входят R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , R_7 , R_8 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , I_{av} , I_{io} , U_{io} , K_{svR} , K_{cmR} , A_u , A_o .

4. Значения параметров линейных моделей ОУ микросхем серий 140, 153, 740 приведены в табл. 4 и 5. Для ОУ с внешней коррекцией значения параметров приведены для типовых величин емкостей коррекции согласно техническим условиям.

Таблица 4

Обозначение параметра модели ОУ	Типономинал моделируемой ИМС				
	140УД6А	140УД6Б, 740УД4-1	140УД7	140УД8А	140УД8Б
	Значение параметра модели ОУ				
R1, МОм	1,00	2,00	0,40	1000,00	1000,00
γ2, кОм	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
R3, МОм	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
R4, кОм	—	—	—	—	—
R5, кОм	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
R6, R7, кОм	5,36	5,36	5,36	3,00	3,00
R8, Ом	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
C1, пФ	6,00	6,00	4,00	4,00	4,00
C2, пФ	13,00	13,00	13,00	12,00	12,00
C3, нФ	1,00	0,79	0,99	0,79	0,31
C4, пФ	—	—	—	—	—
U _{io} , мВ	5,00	8,00	4,00	20,00	20,00
I _{ав} , нА	30,00	43,00	200,00	0,20	0,20
I _о , нА	10,00	15,00	50,00	0,15	0,15
A _о	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84
K _{смR}	80,00	70,00	70,00	64,00	64,00
K _{свR} , $\frac{мкВ}{В}$	200,00	200,00	150,00	100,00	100,00
Δu	70000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Таблица 5

Обозначение параметра модели ОУ	Типономинная моделируемой ИМС				
	140УД14	153УД2, 740УД5-1			153УД6
	Значение параметра модели ОУ при емкости коррекции				
	Ск=30 пФ	Ск=30 пФ	Ск=0	Ск1=30 пФ Ск2=300 пФ	Ск=30 пФ
R1, МОм	30,00	0,30	0,30	0,30	0,60
R2, кОм	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
R3, МОм	10,00	10,00	10,00	100,00	10,00
R4, МОм	—	—	—	4,00	—
R5, кОм	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
R6, R7, кОм	25,00	5,00	5,00	5,00	5,00
R8, кОм	5,00	0,30	0,30	0,30	0,30
C1, пФ	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
C2, пФ	17,00	13,00	30,00	500,00	13,00
C3, пФ	2600,00	790,00	16,00	5,00	790,00
C4, пФ	—	—	15,00	15,00	—
U _{до} , мВ	2,00	5,00	5,00	5,00	2,00
I _{ав} , нА	2,00	500,00	500,00	500,00	75,00
I _ю , нА	0,20	200,00	200,00	200,00	10,00
A _о	0,30	3,84	3,84	3,84	3,84
K _{смR}	85,00	70,00	70,00	70,00	80,00
K _{соR} , $\frac{мкВ}{В}$	100,00	200,00	200,00	200,00	200,00
A _и	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00	50000,00

Методика определения параметров линейной модели ОУ

1. Значения параметров R_1 , R_2 , R_8 в модели равны соответственно значениям входного сопротивления, входной емкости и выходного сопротивления ОУ.

2. Значение параметра A_0 определяют по формуле:

$$A_0 = \frac{R_8 + R_n}{R_8 \cdot R_n}, \quad (48)$$

где R_n — сопротивление нагрузки в схеме измерения коэффициента усиления напряжения.

3. Значения сопротивлений R_6 , R_7 определяются по формуле:

$$R_6 = R_7 = \frac{E_n}{I_{cc}}, \quad (49)$$

где E_n — напряжение источников питания ОУ.

4. Значения тока источников $J_1—J_8$ рассчитываются по формулам (40)—(47).

5. Значения параметров $R_2—R_5$, $C_2—C_4$ находят из АЧХ ОУ. В связи с тем, что частоту полюсов характеристики в модели определяют постоянные времени соответствующих интегрирующих звеньев, то значение параметров R_2 , R_3 , R_5 можно задать произвольно, а значение остальных параметров вычислить по следующим формулам:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot f_{n1}}; \quad (50)$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot f_{n2}}; \quad (51)$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot R_3 \cdot f_{n3}}; \quad (52)$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi \cdot C_2 \cdot f_{n3}}; \quad (53)$$

где f_{n1} , f_{n2} , f_{n3} , f_{n4} — частоты полюсов АЧХ ОУ.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН МИНМАШПРОМ, КВ «Электроавтоматика»

РАЗРАБОТЧИКИ: А.И.Лугин (руководитель темы); А.К.Тимовский; С.В.Панкеев; Т.С.Кланова; В.В.Романов

2. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом Госстандарта Украины № 163 от 29 июня 1994 г.

3. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Редактор Е. Д. Колябасюк
Технический редактор В. М. Попов
Корректор Н. С. Соколинська

Надписано до друку 03 08 94 Формат 60*84 1/16
Ум друк арк 2,79 Зам 1039 Цена договірна

Тиражовано з оригінал-макета, виготовленого СМП «Аверс»,
дільницею оперативного друку УкрНДІССІ
252006, Київ-6, вул Горького, 174