

УДК 621.38
3211.02

Ю.О. Єгоршин, канд. техн. наук
О.Ю. Красноусова

НУЛАТОР-НОРАТОРНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І АКТИВНИХ КІЛ

Інститут електроніки і систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Розглянуто повні нулатор-нораторні моделі для лінійних активних чотириполосників і уточнені моделі для реальних транзисторів і операційних підсилювачей різних типів. Обґрунтовано різні наближені моделі для транзисторів. Уперше запропоновано нулаторну модель для струморізницевого підсилювача. Модель для операційного підсилювача враховує наявність лінійної і нелінійної ділянок передаточної характеристики.

Вступ

Нулатор-нораторні моделі (ННМ) були запропоновані ще в шестидесяті роки минулого століття для вирішення задач аналізу та синтезу активних електричних кіл із використанням ЕОМ [1].

За означенням нулатор (NL) – аномальний електричний елемент, вольт-амперна характеристика якого являє собою точку на початку координат, а вольт-амперна характеристика норатора (NR) – будь-яка безліч точок на площині. Пара нулатор–норатор була названа нулором [1].

Однак у подальшому запропоновані ННМ електронних елементів не знайшли належного застосування через недоліки, що притаманні цим моделям. Дійсно, існуючі ННМ придатні лише для наближеного описання властивостей ідеальних транзисторів та ідеальних операційних підсилювачей напруги, працюючих у лінійному режимі. Уточнення ННМ для біполярного транзистора, наведене, наприклад, у роботі [2], не можна признати задовільним, тому що неможливо спрощення цієї схеми. Не була розроблена ННМ для операційного підсилювача струму (струморізницевого підсилювача). Нулатор-нораторна модель для операційного підсилювача напруги не враховує наявності початкової лінійної ділянки передаточної характеристики підсилювача без від'ємного зворотного зв'язку.

Постановка задачі

У зв'язку з відомими зручностями використання ННМ для вирішення задач аналізу і синтезу електронних кіл, які містять транзистори та операційні підсилювачі [1–3], доцільно провести додаткове дослідження, направлене на уточнення ННМ і синтез нових ННМ із виключенням відмічених недоліків і обмежень.

Запровадження НММ, що точно відображають властивості активних компонентів (транзисторів і підсилювачів різних типів), дозволяє побудувати теорію лінійних кіл із мінімумом елементів.

Але з початку потрібно одержати такі НММ активних чотириполосників, що повністю відповідають рівнянням чотириполосника та дозволяють запроваджувати спрощення цих схем для наближеного опису.

Запропоновані моделі

Розглядаючи рівняння для лінійного активного чотириполосника, враховуючи властивості NL, NR і ННМ для залежних джерел, можна отримати ННМ, що повністю відповідають z , y , h -системам рівнянь (рис. 1).

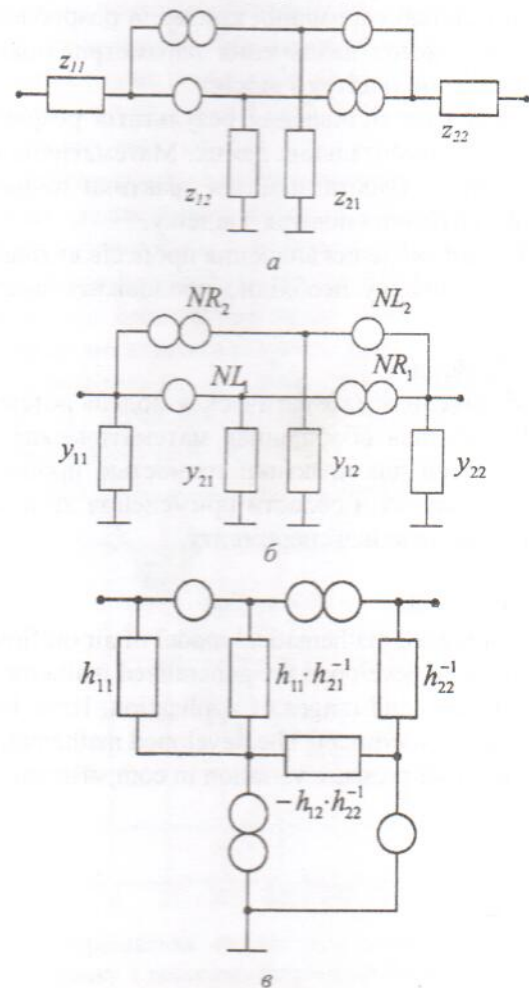


Рис. 1. Нулатор-нораторні моделі з z -параметрами (а), y -параметрами (б), h -параметрами (в)

Ці моделі можна використовувати для транзисторів різних типів. Наприклад, ННМ із h -параметрами (рис. 1, в) є повною і зручною моделлю біполярного транзистора. Нулатор-нораторні моделі (рис. 1) дозволяють отримати і наближені схеми електронних елементів, якщо можна знехтувати значенням того чи іншого параметра.

Наприклад, нехтуючи параметром y_{12} , у схемі (рис. 1, б) можна виключити нулор NL_2, NR_2 (розрив кола), а після нехтування параметром y_{11} можна отримати наближену еквівалентну схему для польового транзистора (рис. 2).

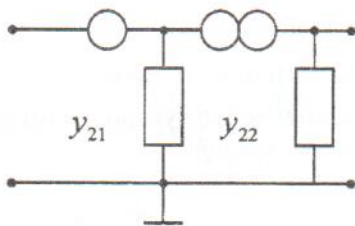


Рис. 2. Наближена еквівалентна схема для польового транзистора

Для схеми, показаної на рис. 1, в, послідовне нехтування параметрами h_{12}, h_{22}, h_{11} призводить до ланцюга наближених еквівалентних схем для біполярного транзистора (рис. 3).

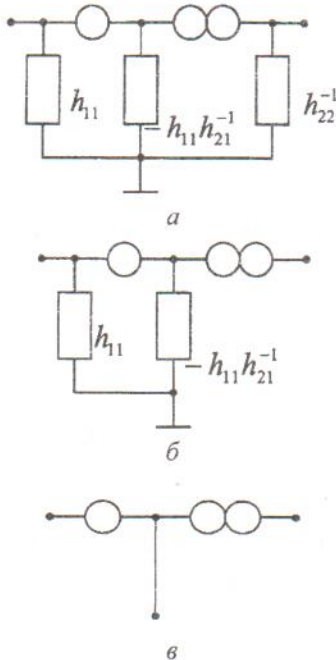


Рис. 3. Перше (а), друге (б) і третє (в) наближення схеми біполярного транзистора

Схема, показана на рис. 3, в, відповідає відомій моделі [1; 2], в якій не враховується ні один із параметрів реального транзистора, тобто ідеальному транзистору, що підключений за схемою з загальним емітером.

Запропонована в праці [2] уточнена ННМ транзистора з фізичними параметрами (рис. 4), хоча і відповідає відомій еквівалентній схемі [2], однак не має сенсу, якщо значення r_K спрямувати до нескінченності.

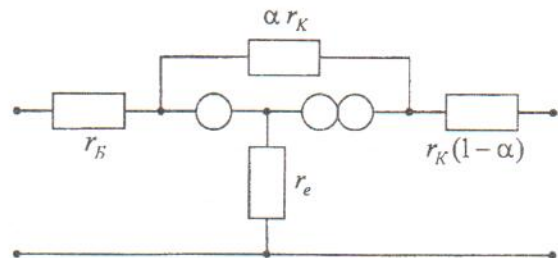


Рис. 4. Нулатор-нораторна модель транзистора з фізичними параметрами

У зв'язку із цим можна запропонувати іншу ННМ із фізичними параметрами транзистора, яка повністю відповідає відомій еквівалентній схемі [2], де $\beta = \alpha / 1 - \alpha$ (рис. 5).

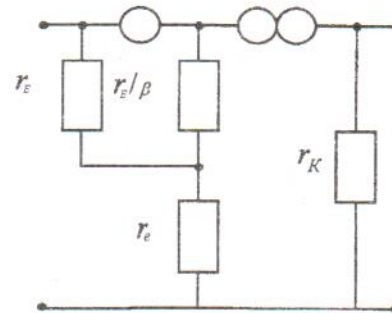


Рис. 5. "Фізична" ННМ

Тепер звернемося до ННМ операційних підсилювачей. Якщо для операційного підсилювача напруги була введена наближена ННМ [1], то для операційного підсилювача струму – струморізницевого підсилювача – такої моделі не було. Розглядаючи рівняння цього підсилювача і його типову схему включення, що наведені в праці [4], можна отримати ННМ, показані на рис. 6, а, б.

Перейдемо до задачі уточнення ННМ для операційного підсилювача напруги. Відомі ННМ [2] інвертувального і неінвертувального підсилювачів зображені на рис. 6, в, г.

У схемах, показаних на рис. 6, в, г, не враховується жоден із параметрів реального операційного підсилювача.

Урахувати реальні параметри операційного підсилювача ($R_{ex}, R_{вих}, K_u$) можливо, якщо за ННМ операційного підсилювача використовувати, наприклад, ННМ, показану на рис. 6, в. При цьому одночасно вдасться врахувати і наявність початкової лінійної ділянки передаточної характеристики підсилювача без зовнішнього від'ємного зв'язку. Нарешті, можна врахувати ефект

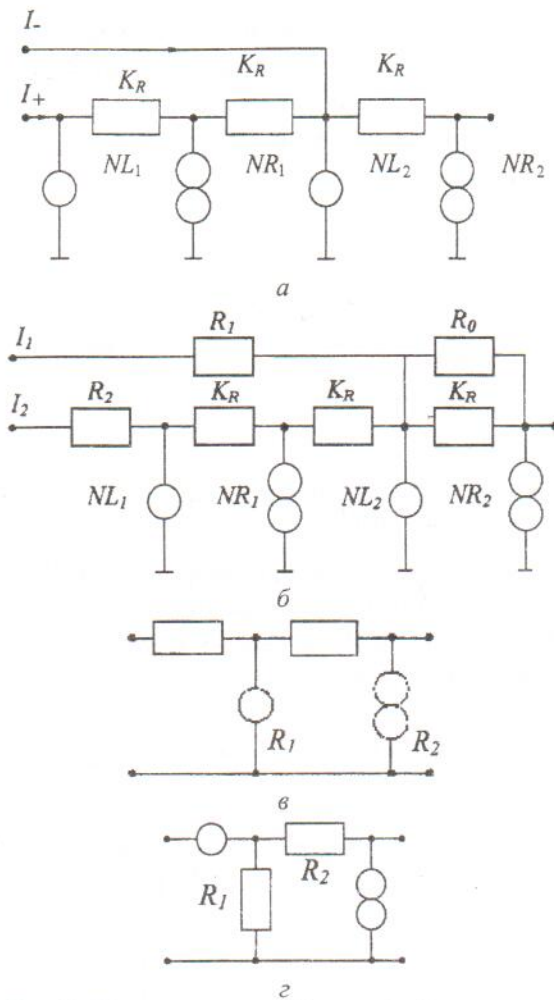


Рис. 6. Нулатор-нораторні моделі підсилювача струму (а), типової схеми включення (б), інвертувального (в) і неінвертувального (г) підсилювачів

насичення підсилювача, вводячи в ННМ додатково двосторонній обмежувач напруги. У зв'язку з зазначеним уточнена ННМ операційного підсилювача напруги має вигляд, показаний на рис. 7.

У схемі, показаній на рис. 7, опір, який забезпечує внутрішній від'ємний зворотній зв'язок, "фіксує" інвертувальний вхід "1" операційного підсилювача. При дуже малому вхідному сигналі, який подається чи на вхід "1", чи на вхід "2", коли вихідна напруга менша за модулем напруги насичення $U^+, |U^-|$, діоди V_1, V_2 закриті. Цей випадок відповідає початковій лінійній ділянці передаточної характеристики збалансованого підсилювача.

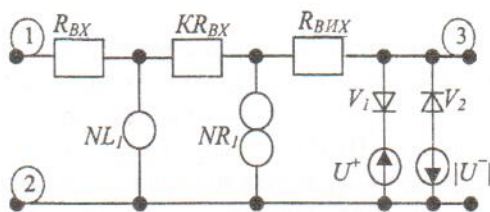


Рис. 7. Уточнена ННМ операційного підсилювача напруги

Як приклад розглянемо розв'язання задачі аналізу лінійного пристрою – інвертувального підсилювача з використанням ННМ (рис. 7).

Еквівалентна схема підсилювача у такому випадку показана на рис. 8.

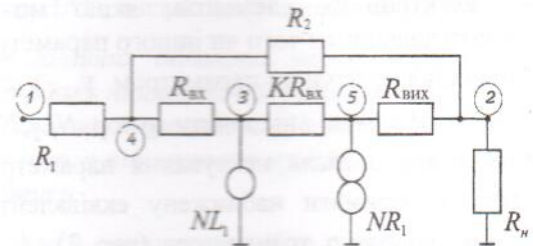


Рис. 8. Еквівалентна схема інвертувального підсилювача

Скорочена матриця $|Y'|$ провідностей цієї схеми з урахуванням зображуваного позначення вузлів на рис. 8 має вигляд:

$$|Y'| = \begin{vmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & Y_{22} & 0 & Y_{25} \\ 0 & 0 & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{44} & 0 \end{vmatrix}$$

де точки відповідають елементам початкової матриці.

У скороченій матриці закреслений п'ятий рядок і третій стовпець початкової матриці. Із матриці $|Y'|$ знаходимо визначники:

$$\Delta_{11} = -Y_{22}Y_{44}Y_{35} - Y_{34}Y_{25}Y_{42};$$

$$\Delta_{12} = -Y_{41}Y_{34}Y_{25}.$$

Ураховуючи вираз кожної із провідностей, знайдемо коефіцієнт передачі K_U :

$$K_U = -\frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11}} = -\frac{g_1 g_{\text{внх}}}{(g_{\text{вх}} + g_{\text{внх}} + g_2)(g_1 + g_{\text{вх}})K^{-1} + g_{\text{внх}} g_2}, \quad (1)$$

де $g = R^{-1}$.

Із рівняння (1) неважко отримати вираз K для окремих випадків:

– при $K^{-1} = 0$

$$K_U = -\frac{g_1}{g_2} = -\frac{R_2}{R_1};$$

– при $g_{\text{вх}} = 0, K^{-1} > 0$

$$K_U = -\frac{g_1 g_{\text{внх}}}{(g_{\text{внх}} + g_2)g_1 K^{-1} + g_{\text{внх}} g_2}.$$

Зручності використання НММ проілюструємо на прикладі аналізу схеми гиратора (рис. 9), що була запропонована в праці [1].

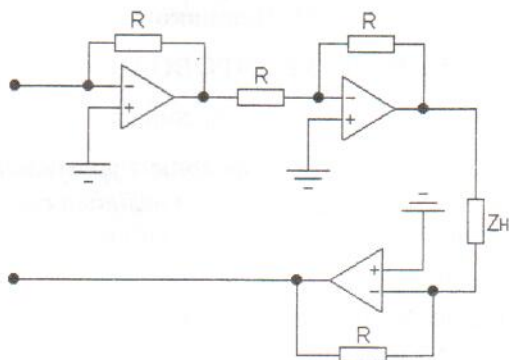


Рис. 9. Схема гиратора

Для операційних підсилювачів використовуємо спрощені НММ. Тоді еквівалентна схема гиратора набуває вигляду, показаному на рис. 10.

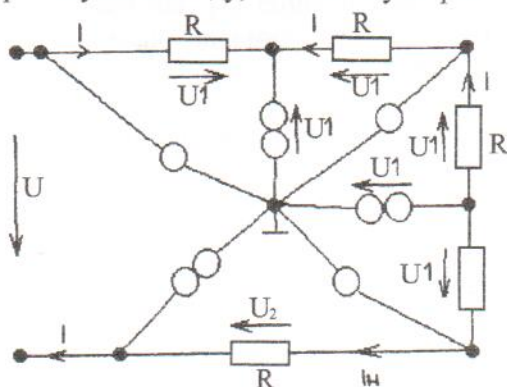


Рис. 10. Нулатор-нораторна модель гиратора

У схемі (рис. 10) є можливість одразу визначити нульові потенціали всіх вузлів, що з'єднуються з нулаторами, а також струми гілок, що з'єднуються з цими вузлами.

Для верхнього зажиму схеми задаємо вхідний струм I та використовуємо властивості NL, а також закони Кірхгофа й Ома. Тоді послідовно об-

ходимо схему та одержуємо напруги для всіх елементів, а також струми для гілок, де є опори.

Вказуємо напрями та значення напруг і струмів на рис. 10, де

$$U_1 = IR;$$

$$U_2 = I_H R;$$

$$I_H = U_1 / Z_H.$$

Одержуємо значення напруги для входу

$$U = U_2$$

та опір для входу

$$Z_{вх} = U/I = R^2 / Z_H.$$

Висновки

Для активних лінійних чотирьохполосників отримані повні НММ. Для транзисторів, які дозволяють врахувати основні параметри транзистора, НММ уточнені. Наближенні НММ, що впливають із повних НММ активного чотирьохполосника, обґрунтовані.

Для струморізницевого підсилювача – операційного підсилювача струмів – запропоновані НММ і для операційного підсилювача напруги уточнена НММ. Остання НММ враховує основні параметри підсилювача, наявність лінійної ділянки передаточної характеристики і наявність нелінійних ділянок передаточної характеристики через ефект насичення підсилювача.

Список літератури

1. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
2. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи. Новые разделы курса теоретических основ электротехники. – М.: Высш. шк., 1983. – 336 с.
3. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. – М.: Высш. шк., 1976. – 208 с.
4. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 03.04.03.

Ю.А. Егоршин, О.Ю. Красноусова

Нулатор-нораторные модели электронных элементов и активных цепей

Рассмотрены полные нулатор-нораторные модели для линейных активных четырехполосников и уточненные модели для реальных транзисторов и операционных усилителей разных типов. Обоснованы разные приближенные модели для транзисторов. Впервые предложена нулаторная модель для токоразностного усилителя. Модель для операционного усилителя учитывает наличие линейного и нелинейного участков передаточной характеристики.

J.A. Jegorshin, O.J. Krasnousova

Nolator-norator models of electronic elements and active circuits

In this article we suggest complete nolator-norator models of active line quadruples and adjusted models of real transistors and operational amplifiers of different types. We also prove different approximate models of transistors. We offer nolator model of current distributor intensifier at first. The model of operational amplifiers also takes into account the presence of basic blocks and nonlinear blocks of the transmissive characteristic.