технічним вимогам, то можна вважати, що відповідна система забезпечить штатні режими роботи. На якісному рівні, локальний баланс означає баланс між інтенсивністю вимог на обслуговування вхідного потоку, та інтенсивністю обслуговування системою відповідного потоку.

В рамках даного підходу існує можливість забезпечення балансу і для змішаної мережі. Змішана мережа, це є мережа, що складається з різних типів центрів обслуговування, котрі відрізняються між собою дисциплінами обслуговування черги, прикладом таких дисциплін можуть бути дисципліни типу FC, FS, PS, IS та $LCFS$, що відрізняються кількістю приладів обслуговування, розподілом часу обслуговування. Наприклад, такий розподіл може бути експоненціальним, або відповідати закону Кокса [6].

Приведений спосіб формалізації опису роботи мережі не являється достатнім, але дозволяє отримати орієнтовні оцінки параметрів базових компонент вузлів зв'язку, якщо відомі параметри вимог до такої мережі. Класичним переходом від теоретичних параметрів мережі до їх практичної апробації є використання імітаційного моделювання системи зв'язку. Таке моделювання полягає в тому, що структурна схема системи зв'язку описується у вигляді графу. Вершини графу відповідають окремим вузлам зв'язку. Для моделювання випадкових процесів, що мають місце в мережі, використовується генератори випадкових чисел, що забезпечують необхідні функції розподілу випадкових параметрів. Кожна вершина графу розширюється окремою моделлю, яка описує в певному наближенні роботу вузла зв'язку в частині функцій, що описується в рамках СМО. Сама методика реалізації імітаційного моделювання досить детально описується у роботі.

1. *Велецкий И.Г., Кильдышев Г.С.* Основы теории вероятностей и математической статистики. - М.: Статистика, 1968.
2. *Захаров Г.П.* Методы исследования сетей передачи даннях. - М.: Радио и связь, 1982, 208 с.

Поступила 21.01.2009р.

УДК 621.372.061

Ю.І. Шаповалов, Національний університет “Львівська політехніка”

ЧАСТОТНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ЕЛЕМЕНТА У ЛІНІЙНОМУ ПАРАМЕТРИЧНОМУ КОЛІ

Розглянуто можливість побудови частотної моделі параметричного елемента у заданому лінійному параметричному колі. Модель дозволяє

проводити частотний аналіз параметричного кола у повній мірі звичними методами, алгоритмами та програмами, що застосовуються при аналізі кіл з постійними параметрами.

ВСТУП

У роботах [1,2,3] детально описано метод частотного символьного аналізу лінійних параметричних кіл, оснований на визначенні за заданим диференціальним рівнянням кола

$$a_n(t)y^{(n)} + a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \ldots + a_1(t)y = b_m(t)x^{(m)} + b_{m-1}(t)x^{(m-1)} + \ldots + b_1(t)x \quad (1)$$

(y – вихідний та x − вхідний сигнали; $a_i(t)$, $b_j(t)$ – відомі функції часу t; початкові умови нульові) апроксимації передавальної функції у вигляді усіченого ряду Фур'є

$$\hat{W}(s,t) = W_0(s) + \sum_{i=1}^{k} [W_{-i}(s)\exp(-ji\Omega t) + W_{+i}(s)\exp(+ji\Omega t)], \quad (2)$$

яка зв'язує вхідний та вихідний сигнали кола у частотній області наступним чином [4,5]:

$$y(s,t) = \hat{W}(s,t) \cdot x(s), \quad (3)$$

($s = j\omega$ - комплексна змінна).

З виразів (2)-(3), зокрема, випливає відомий факт про те, що при дії гармонічного сигналу $x(s) = e^{st} = e^{j\omega t}$ на вході у вихідному сигналі $y(s,t)$ присутні гармоніки з частотами $\omega \pm i\Omega$ [6].

Аналіз параметричного кола, у якому, нехай, тільки один параметричний елемент, згаданим методом проводиться за наступними кроками [3]:

1. Відносно змінних x та y для кола визначається диференціальне рівняння вигляду (1). Зазвичай [2], у ролі змінної y вибирається не вихідний сигнал, а напруга чи струм на параметричному елементі, оскільки у цьому випадку вираз (1) суттєво спрощується. Далі у статті вважається, що у якості y вибрано струм i_p, протікаючий через параметричний елемент.
2. Визначається передавальна функція між вхідним сигналом x (нехай вхідним струмом $i_{вх}$) та i_p у вигляді (2) [3].
3. Параметричний елемент у досліджуваному колі замінюється джерелом струму, величина якого по формі і значенням дорівнює струму i_p, визначеному з (3) за допомогою (2).
4. Для знаходження інших змінних формується частотна математична модель параметричного кола, у якій джерело $i_p(i_{вх})$, по аналогії з джерелом $i_{вх}$, вписується у вектор джерел сигналів, а тому матриця параметрів елементів кола складається тільки з постійних

параметрів. Це значить, що отримана таким чином математична частотна модель представляє задане параметричне коло у вигляді кола з постійними параметрами при дії на нього двох джерел сигналів $i_{вх}$ та $i_p(i_{вх})$. Так модель кола, складена, наприклад, за методом вузлових напруг, може мати наступний вигляд:

$$Y(s)\cdot U(\omega\pm i\Omega)=I(\omega\pm i\Omega)\,, \qquad (4)$$

де $Y(s)$ - матриця провідності, що складається з постійних параметрів елементів кола, $U(\omega+i\Omega)$ та $I(\omega+i\Omega)$ - вектори невідомих вузлових напруг та джерел струмів, поданих на коло, $i=-k,-(k-1),...,-1,0,1,...(k+1),k$.

5. Визначення вузлових напруг заданого кола, інших змінних цього кола, можливо, вихідного сигналу та необхідних передавальних функцій проводиться по моделі (4) класичними методами, що застосовуються до кіл з постійними параметрами, з тією особливістю, що при дії гармонічного сигналу $i_{вх}=e^{j\omega t}$ на вході кола джерело струму $i_p(i_{вх})$, а значить і всі інші змінні кола, будуть містити гармоніки з частотами $(\omega\pm i\Omega)$. Не слід забувати, що при розв'язуванні рівняння (4) на конкретній гармоніці, елементи матриці $Y(s)$ потрібно обчислювати на частоті цієї ж гармоніки. Тому остаточно модель кола запишемо у вигляді:

$$Y(\omega\pm i\Omega)\cdot U(\omega\pm i\Omega)=I(\omega\pm i\Omega)\text{, де } i=-k,-(k-1),...,-1,0,1,...,(k-1),k\,. \qquad (5)$$

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Хоча модель (5) і дозволяє розраховувати параметричне коло у частотній області, все ж вона має наступні суттєві недоліки:

1. Вираз (5) розв'язується для кожної гармоніки, а не для комплексної змінної s, тому й обчислення схемних функкій у символьному вигляді $W(s,t)$ пов'язане з певними труднощами.
2. У моделі (5) є фіксовані вузли прикладення вхідного сигналу, і при потребі їх поміняти (така потреба може виникнути при проектуванні кола) аналіз необхідно повторити з пункту 1. А це пов'язано з значними додатковими, особливо при виконанні пункту 2, обчислювальними витратами.

Недолік 1 можемо усунути, залишивши вираз для $i_p(i_{вх})$ при побудові частотної моделі кола на кроці 4 у символьному вигляді:

$$i_p(s,t)=\hat{W}(s,t)\cdot i_{вх}(s)\,, \qquad (6)$$

і не представляти його сумою гармонік. Тоді модель (5) матиме теж символьний вигляд:

$$Y(s)\cdot U(s,t)=I(s,t)\ ,\qquad (7)$$

у векторі $I(s,t)$ якої містяться, по крайній мірі, два ненульові елементи з заданою величиною $i_{вх}$ та $i_p(i_{вх})$ у вигляді (6), відповідно. У такій моделі (7) хоча й усунуто недолік 1 моделі (5), але недолік 2 залишається, і з'являється інший недолік: значення будь-якої, визначеної з (7), невідомої змінної буде складатись з двох доданків, які визначають залежність цієї змінної від струму $i_{вх}$ та струму $i_p(i_{вх})$, відповідно. А це вимагає більших обчислювальних затрат, ніж при наявності у векторі $I(s,t)$ одного джерела сигналу $i_{вх}$.

Ціль даної роботи – запропонувати модель параметричного кола, основану на методі вузлових напруг, у якій відсутні недоліки моделей (5) та (7), та обчислення довільних змінних і передавальних функцій кола у кроці 5 не вимагало б повторних обчислень передавальної функції (2).

ІДЕЯ РОЗ'ВЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Як витікає з вище наведеного, моделі (5) та (7), дозволяють аналізувати параметричні кола, але, разом з тим, мають певні недоліки, які, на наш погляд, пов'язані з тим, що у кроці 4 джерело $i_p(i_{вх})$ вписується у вектор вільних членів частотної моделі (4). Поза тим, це джерело можемо трактувати залежним джерелом струму i_p, керованим вхідним струмом $i_{вх}$. Оскільки для ілюстрації матеріалу обрано метод вузлових напруг, то керуючою гілкою обираємо не $i_{вх}$, а $u_{вх}$, і отримане залежне джерело $i_p(u_{вх})$ з визначеним у кроці 2 параметром (предавальною функцією від $u_{вх}$ до i_p) по звичним при частотному аналізі правилам у кроці 4 вписуємо у матрицю провідності $Y(s)$. У цьому випадку частотною моделлю параметричного кола є рівняння

$$Y(s,t)\cdot U(s,t)=I(s)\qquad (8)$$

з залежним джерелом $i_p(s,t)=\hat{W}(s,t)\cdot u_{вх}(s,t)$, параметр якого $\hat{W}(s,t)$ за традиційними правилами вписаний у матрицю провідності $Y(s,t)$, та одним елементом $i_{вх}$ у векторі струмів сигналів $I(s)$.

З іншого боку, зауважимо наступне. Ряд авторів [4,5,7] зі змінними x та y у виразі (1) пов'язують зовнішні (вхідну та вихідну) змінні кола. Але у кроці 1 з обранням змінною y не вихідної змінної кола, а, як зазначено вище, змінної кола, пов'язаної з параметричним елементом, ми вже частково відійшли від цієї традиції. Тому далі пропонуємо відійти від цієї традиції повністю. Так, керуючою напругою у залежному джерелі можемо обрати не напругу $u_{вх}$, а напругу між довільною парою вузлів параметричного кола, звільняючи при цьому вхід кола від керування струмом, що протікає через параметричний елемент. При такій заміні, на наш погляд, потрібно пам'ятати, що у реальному параметричному колі не всі його змінні напруги (вузлові чи на елементах) містять повний набір гармонік з ряду частот $(\omega \pm i\Omega)$. Так, наприклад, у двоконтурному параметричному підсилювачі на сигнальному контурі присутня, в основному, тільки гармоніка з частотою сигналу ω_c, а на холостому контурі – тільки гармоніка з частотою ω_x. Тому **пропонуємо керуючою та керованою гілками залежного джерела, що моделює параметричний елемент, обрати напругу та струм, безпосередньо пов'язані з самим параметричним елементом.** Такий підхід дозволить звільнити вхід та вихід параметричного кола від присутності у виразі (1), пов'язати вираз (1) зі змінними параметричного елемента і, на цій основі, визначити частотну модель параметричного елемента для заданого параметричного кола. Таким чином усуваються недоліки моделей (5) та (7), а визначена частотна модель параметричного елемента разом з традиційними моделями інших елементів кола з постійними параметрами дозволяє зформувати частотну модель кола (по аналогії з лінійними колами з постійними параметрами), яка й буде основою моделювання лінійних параметричних кіл у частотній області.

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ЧАСТОТНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЙНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО КОЛА

Пропонуємо один з можливих алгоритмів побудови частотної моделі параметричного елемента для заданого лінійного параметричного кола. Вважаємо, що у колі тільки один параметричний елемент.

1. У заданому колі виділимо параметричний елемент (нехай це ємність $c(t)$), як показано на рис. 1, де А – частина кола з постійними параметрами. Для частини кола А складаємо диференціальне рівняння виду (1), у якому x та y - це змінні u та i_a з рис. 1, відповідно.

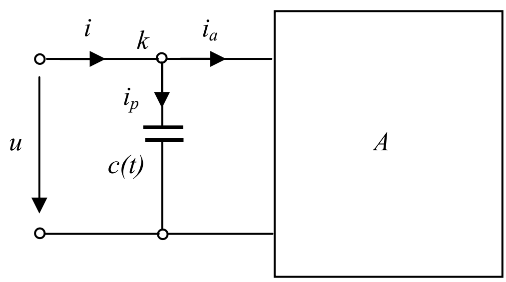

Рис. 1. Параметричне коло з виділеним параметричним елементом

З рис. 1 випливає, що $i_a = i - i_p$. Для ємності $i_p = c(t) \cdot u' + c'(t) \cdot u$.

Підставляємо ці вирази у вираз (1), отриманий для частини А, і визначаємо вираз (1) відносно змінних u та i для кола вцілому. Аналогічно поступаємо у випадку, коли параметричним елементом є провідність чи індуктивність. У останньому випадку позбавляємось інтегралу, як наведено у [8].

2. По отриманому виразу (1) визначаємо частотну передавальну функцію кола (3) від u до i у вигляді (2):

$$i = \hat{W}(s,t) \cdot u \,. \tag{9}$$

3. Частотну модель параметричного елемента для заданого кола шукаємо у вигляді двополюсника, під'єднаного до тих же вузлів, що й параметричний елемент. Провідність (параметр) такого двополюсника $y(s,t)$ визначимо наступним чином. Оскільки шукана модель цього двополюсника є частотною моделлю, то її параметр $y(s,t)$ за звичайними правилами можемо вписати у Y матрицю провідності всього кола. Відношення i/u згідно позначень з рис. 1 (вхідна провідність кола зі сторони параметричного елемента) у такому випадку можемо представити у вигляді [9]:

$$\frac{i}{u} = \frac{\Delta}{\Delta_{kk}} = \frac{A_0(s) + y(s,t) \cdot A_1(s)}{B(s)}\,, \tag{10}$$

де Δ, Δ_{kk} - визначник та алгебраїчне доповнення матриці провідності Y; $A_0(s), A_1(s), B(s)$ - степеневі поліноми комплексної змінної s.

З виразів (9) і (10) випливає рівність:

$$\hat{W}(s,t) = \frac{A_0(s) + y(s,t) \cdot A_1(s)}{B(s)}\,, \tag{11}$$

з якої й визначаємо шукану провідність $y(s,t)$ частотної моделі параметричного елемента у заданому колі:

$$y(s,t) = \frac{\hat{W}(s,t) \cdot B(s) - A_0(s)}{A_1(s)}\,. \tag{12}$$

ВИСНОВКИ

1. У роботі розглянута можливість побудови частотної моделі параметричного елемента у параметричному колі та запропоновано алгоритм її визначення.

2. Така частотна модель елемента представляє собою двополюсник з параметром $y(s,t)$, визначається для кола один раз і дозволяє багаторазово обчислювати змінні кола та необхідні його вторинні параметри у вигляді дробово-раціональних схемних функцій комплексної змінної $s = j\omega$ при підстановці у них значень $y(s,t)$ на останніх етапах розрахунків.

3. Запропонована частотна модель кола дозволяє проводити аналіз параметричних кіл за допомогою традиційних методів та програм, що

використовуються при символьному топологічному аналізі лінійних кіл з постійними параметрами.

4. Використання запропонованої частотної моделі елемента не приводить до появи у колі додаткових джерел сигналів.

5. Використання пропонованої частотної моделі дозволяє проводити частотний символьний аналіз, статистичні дослідження та оптимізацію параметричних кіл виключно у частотній області, не звертаючись до часової.

1. Шаповалов Ю.І., Шувар Б.А. Підвищення ефективності частотних методів аналізу параметричних кіл // Вісн. ДУ «Львівська політехніка», №302, 1996, с.71
2. Ю. Шаповалов. Моделювання лінійних параметричних кіл частотним символьним методом // Вісн. ДУ „Львівська політехніка". - №343. - 1998. - С126-132.
3. Шаповалов Ю., Мандзій Б. Символьний аналіз лінійних параметричних кіл: стан питань, зміст і напрямки застосування // Теоретична електротехніка. 2007. Вип. 59, с.3-9.
4. Солодов А.В., Петров Ф.С. Линейные автоматические системы с переменными параметрами. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат.лит., 1971. – 620 с.
5. Zadeh L. A. Frequency Analysis of Variable Networks // Proc. of the IRE, vol.39, 1950.
6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы // М.: Сов. радио. 1977.
7. Тафт В.А. Электрические цепи с переменными параметрами. - М.: Энергия, 1968. – 328 с.
8. Ю. Шаповалов. Формування рівнянь лінійних параметричних кіл топологічним методом // Вісн. «Радіоелектроніка та телекомунікації» НУ Львівська політехніка. -№ 595. - 2007. с. 3-6.
9. Сигорский В.П., Петренко А.И. Основы анализа электронных схем. - К.: Вища школа, 1971. - 568 с.

Поступила 19.01.2009р.

УДК 004.942

В.М.Теслюк, к.т.н., доцент кафедри САП, НУ «Львівська політехніка»,
А.Я.Зелінський, аспірант НУ «Львівська політехніка»,
Хамза Алі Юсеф Аль Шавабкех, аспірант НУ «Львівська політехніка».

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГІЛОК ТА ГРАНИЦЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ МНОЖИНИ АЛЬТЕРНАТИВНИХ РІШЕНЬ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ СИНТЕЗУ МЕМС

В роботі застосовано метод гілок та границь для зменшення потужносі множини альтернативних структур МЕМС. На основі цього алгоритму розроблено підсистему, яка дає змогу автоматизувати процес зменшення потужності множини альтернативних рішень та наведено результати вичислювальних експерементів.

