

значних величин парних гармонік і насамперед другої. Результати досліджень вказують, що вибір параметрів фільтрів виконаний без врахування конструктивних відхилень параметрів фільтрових конденсаторів та реакторів, може спричиняти істотне збільшення струмів резонансних гармонік системи під час увімкнення трансформатора ДСП [6]. Це, з одного боку, створює небажані впливи на трансформатор системи TS та фільтрові кола СТК, а з іншого, практично “паралізує” роботу системи регулювання СТК і робить неможливою її адекватну дію. Особливо це проявляється у разі появи граничних значень амплітуд КСН.

Висновки

Досліджено можливості використання СТК для компенсації однополярних струмів у системі електропостачання, спричинених увімкненням пічних трансформаторів ДСП. Показано принцип реалізації регулювання тиристорно-реакторної групи СТК у цих умовах. Встановлено закономірності вибору характеристик каналу коригування, який дає змогу забезпечити адекватне регулювання СТК під час увімкнень трансформатора, та показано вплив гармонік струму ввімкнення на характеристики регулювання СТК в цих умовах.

1. Варецкий Ю.Е., Гапанович В.Г., Кенс Ю.А., Жураховский А.В., Стряпан В.Н. Исследование бросков токов намагничивания в системе электроснабжения сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // *Техническая электродинамика*. – Киев, Наук. думка, 1990. – № 2. – С. 38–43.
2. Rye J. Remanent flux in distribution transformers // *Electricity Council Research ECRC-M747*. – 1974.
3. Huber F. Inrush current of distribution transformers // *Brown Boveri Rev.* – 1965. – Vol.52, № 11, 12. – P. 908–916.
4. Sybille G., Gavrilovic M.M., Belanger J. Transformer saturation effects on EHV system overvoltages // *IEEE Trans. on PAS*. – 1985. – Vol. 104, № 3. – P. 671–680.
5. Варецкий Ю.О. Гармоніки струму ввімкнення трансформатора в електропостачальних системах // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2002. – №449: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 29–36.
6. Varetski J., Hanzelka Z., Klempka R. Transformer energization impacts the filter performance // *Proc. of 8 Int. Conf. "Electric power quality and utilization"*. – 2005. – P. 313–318.

УДК 621.372.5

А.Ю.Воробкевич

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ТЗЕ

АПРОКСИМАЦІЯ МАТРИЦЬ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ОДНОРІДНИМИ ЛІНІЯМИ

© Воробкевич А.Ю., 2010

Розглянуто вплив навантаження однорідної лінії як елемента електричного кола на точність апроксимації матриці провідностей кола. Для однорідної лінії враховано залежність подовжинних опорів та провідності від частоти.

The influence of load resistance of homogeneous line on precision of approximation of circuit admittance matrix is considered. For homogeneous line dependence of distributed resistance and conductance from frequency take in account.

Постановка проблеми

Під час моделювання перехідних і усталених процесів у електричних колах виникає задача побудови для окремих блоків, що працюють у лінійному режимі і можуть містити мікросхеми, однорідні лінії, розподілені RC-структури, паразитні елементи друкованого монтажу, спрощених

макромоделей заданої точності з мінімальною кількістю вузлів та RLC -елементів із зосередженими параметрами. Такі макромоделі легко адаптуються до більшості програм аналізу складних електричних кіл, а також можуть бути використані як основа для створення нових блоків з простішою структурою у разі фізично реалізованих параметрів їх елементів. Вони можуть бути сформовані на основі отриманих розрахунковим чи експериментальним способом амплітудно- та фазочастотних характеристик елементів матриць блоків як багатополісників. Точна апроксимація дробово-раціональними функціями елементів матриці провідностей блока є першим етапом формування макромоделі.

Аналіз останніх досягнень та публікацій

Темі апроксимації операторними функціями елементів матриці параметрів підсхеми як етапу макромодельовання в частотній області присвячені роботи [1, 2], де використовуються як початкові дані матриці підсхем з відомою структурою, а потім понижується порядок матриці за алгоритмом Ланцоша. За амплітудно- та фазочастотними характеристиками апроксимуються методом найменших квадратів окремі схемні функції [3], а в роботі [4] – додатні дійсні матриці пасивних багатополісників без доказу компактності їх ненульових кінцевих полюсів, що є необхідною умовою реалізації макромоделі з мінімальною кількістю вузлів. Розрахункова модель однорідної лінії з урахуванням скін-ефекту та частотнозалежних втрат у діелектрику подана в роботі [5].

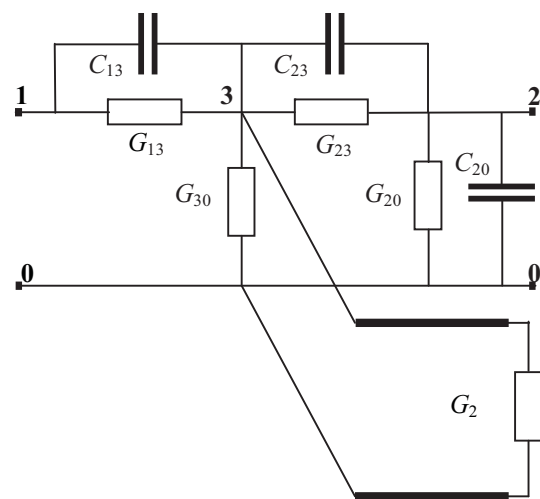
Формулювання цілі статті

Дослідити вплив параметрів однорідної лінії та її навантаження на точність апроксимації усіх елементів матриці провідностей програмою, що забезпечує компактність полюсів блока, та показати принципи її роботи з урахуванням залежності подовжинних опору та провідності лінії від частоти.

Виклад основного матеріалу

Дослідження точності апроксимації здійснено на прикладі коректувальної ланки, до якої під'єднана кабельна однорідна лінія, як показано на рисунку. Тестовими сигналами є синусоїдні коливання в діапазоні до 200 МГц. Незалежними полюсами такого невірноваженого чотириполісника є вузли 1 і 2, залежним – вузол 0, а вузол 3 є внутрішнім вузлом. Проста схема вибрана для того, щоб мінімізувати вплив на точність апроксимації матриці всіх параметрів елементів кола, крім комплексної вхідної провідності однорідної лінії $\underline{Y}_V$. У цьому випадку при довжині лінії $l=0$, коли $\underline{Y}_V = G_2$, досягається висока точність апроксимації. Подібні схеми використовуються у відгалужувачах кабельних систем зв'язку. Вплив навантаження лінії на параметри матриці чотириполісника залежить від способу увімкнення лінії. Наприклад, при її увімкненні між еквіпотенціальними точками кола вплив вхідного опору лінії, а, значить, і навантаження взагалі відсутній. Для дослідження вибрано традиційний спосіб увімкнення лінії, коли оболонка кабеля заземлена.

Апроксимація здійснюється за алгоритмом [6], модернізованим до вимоги відсутності безмежно великих вхідних і взаємних провідностей на постійному струмі в чотириполіснику, що підлягає макромодельованню. Для того, щоб отримати



Тестовий чотириполісник

остаточний результат апроксимації – матрицю провідностей неврівноваженого чотириполосника $Y(p)$, розміром 2×2 , елементи якої є операторними дробово-раціональними функціями зі спільним поліноміальним знаменником, спочатку необхідно визначити коефіцієнти полінома цього знаменника. При цьому всі корені знаменника (полюси елементів матриці) $Y(p)$ повинні перебувати в лівій півплощині для забезпечення стійкості макромоделі, що має формуватися за результатами апроксимації. Аналогічні вимоги з тих самих міркувань ставляться і до коренів поліномів чисельників (нулів) діагональних елементів $Y_{11}(p)$ та $Y_{22}(p)$ матриці $Y(p)$.

Для врахування властивостей кожного з елементів матриці $Y(p)$ визначаються в точках рівномірного частотного діапазону $0 < \omega_i \leq 200$ МГц комплексні значення функції

$$\det \underline{Y}(j\omega_i) = \underline{Y}_{11}(j\omega_i)\underline{Y}_{22}(j\omega_i) - \underline{Y}_{12}(j\omega_i)\underline{Y}_{21}(j\omega_i). \quad (1)$$

При визначенні значень $\underline{Y}_{mn}(j\omega_i)$ у виразі (1) комплексний вхідний опір лінії та коефіцієнт розповсюдження обчислюються з урахуванням того, що подовжинний опір R_{0i} визначається з урахуванням скін-ефекту [7] за формулою

$$R_{0i} = R_{00} (0,25 + a_i^{0,5} + 3/64 a_i^{-0,5} + 1/130 a_i^{-1,5} - 2/309 a_i^{-2} + 3/824 a_i^{-2,5}), \quad (2)$$

де R_{00} – подовжинний опір лінії для постійного струму, а параметр a_i визначається, як

$$a_i = \omega_i \mu_0 / (8\pi R_{00}). \quad (3)$$

Подовжинна провідність, зважаючи на збільшення втрат у діелектрику з частотою, обчислюється за формулою

$$G_{0i} = G_{00} + \omega_i C_0 \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

де G_{00} – подовжинна провідність лінії для постійного струму; C_0 – подовжинна ємність лінії; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута втрат.

Далі функція $\det \underline{Y}(j\omega_i)$ апроксимується за модулем та фазою з використанням методів лінійного програмування [8] дробово-раціональною операторною функцією $A(p)$ мінімального порядку, що має нулі та полюси в лівій півплощині. Для забезпечення такого їх розташування спочатку апроксимується квадрат модуля $\det \underline{Y}(j\omega_i)$, а потім визначається функція $A(p)$ [9]. Під час апроксимації квадрата модуля відносна похибка модуля дуже мала, а похибка фази для більшості кіл зростає майже лінійно із збільшенням частоти. Тоді корекцію фази можна здійснити, незначно збільшивши похибку модуля, шляхом одночасної зміни найбільшого за модулем дійсного кореня σ та коефіцієнта найвищого степеня полінома чисельника K . Нові значення кореня чисельника σ' та коефіцієнта K' визначаються за формулами

$$\sigma' = \omega_{\max} \sigma / (\omega_{\max} - \sigma \Delta \psi_{\max}), \quad (5)$$

$$K' = K \sqrt{(\sigma^2 + \omega_{\max}^2 / 4)} / \sqrt{(\sigma')^2 + \omega_{\max}^2 / 4}, \quad (6)$$

де $\omega_{\max}$ – найбільша кутова частота діапазону; $\Delta \psi_{\max}$ – похибка фази в радіанах.

Крім того виконується корекція коренів методом лінійного програмування.

Використовуючи тотожність Сильвестра [10] можна довести, що для довільної триполосної підсхеми

$$A(p) = \Delta(p) / \Delta_{1122}(p), \quad (7)$$

де $\Delta(p)$ і $\Delta_{1122}(p)$ – визначник і мінор, отриманий шляхом викреслення 1-го та 2-го рядків і стовпців матриці, складеної за методом вузлових напруг для всіх незалежних вузлів підсхеми. Поліном $\Delta_{1122}(p)$ є спільним знаменником усіх елементів матриці $Y(p)$, тому, підставивши у нього значення $p_i = j\omega_i$, отримаємо комплексні значення чисельників $\underline{F}_{mn}(j\omega_i)$ усіх елементів за формулою

$$\underline{F}_{mn}(j\omega_i) = \underline{Y}_{mn}(j\omega_i) \Delta_{1122}(j\omega_i). \quad (8)$$

Після цього проводиться апроксимація поліномів $\underline{F}_{mn}(j\omega_i)$ методом лінійного програмування з дотриманням вимоги до лишків в ненульових простих полюсах

$$\underline{K}_{r11}\underline{K}_{r22} - \underline{K}_{r12}\underline{K}_{r21} = 0. \quad (9)$$

На наступному етапі – реалізації створюється макромодель як RLC -схема з мінімальною кількістю вузлів, якщо виконується умова (9), а якщо – ні, то кількість вузлів зростає на величину, що дорівнює степеню полінома $\Delta_{1122}(p)$.

Точність апроксимації для всіх Y -параметрів оцінюється відносною похибкою модуля відхилення в точках частотного діапазону

$$\delta_{mn}(\omega_i) = \left| \underline{Y}_{mn}(j\omega_i) - \underline{Y}_{Amn}(j\omega_i) \right| / \left| \underline{Y}_{mn}(j\omega_i) \right|, \quad (10)$$

та максимальною серед них похибкою $\delta_{\max}$. Значення $\underline{Y}_{Amn}(j\omega_i)$ обчислюється в частотній точці апроксимованої дробово-раціональної функції відповідного Y -параметра. Такий вибір оцінки точності дозволяє одночасно оцінити похибку модуля і фази. У зв'язку з високою граничною частотою $f = 200$ МГц проводилася нормалізація параметрів за рівнем та частотою. Ненормований хвильовий опір з урахуванням скін-ефекту та втрат у діелектрику змінюється від $\underline{Z}_c = 75,0018 \exp(-j0,17^\circ)$ Ом у першій частотній точці до $\underline{Z}_c = 74,99982 \exp(j0,029^\circ)$ Ом в останній. Для визначення можливостей реалізації з мінімальною кількістю вузлів степінь полінома $\Delta(p)$ не збільшувався і дорівнював 3. Усі апроксимаційні процедури виконувались з подвійною точністю і не тривали більше 2 с. Програма містить близько 4000 операторів. У таблиці показана залежність $\delta_{\max}$ у відсотках від довжини лінії у метрах та від ненормованого значення активного опору навантаження $R_2 = 1/G_2$ в Омах. При довжині лінії $l = 0$ та $R_2 = 75$ Ом $\delta_{\max} = 0,0074$ %.

	$l = 50$ м	$l = 75$ м	$l = 100$ м	$l = 125$ м	$l = 150$ м
$R_2 = 77$ Ом	68,33	40,5	78,04	76,73	77,33
$R_2 = 76$ Ом	28,19	24,04	77,08	76,56	76,91
$R_2 = 75$ Ом	1,08	5,25	3,42	0,16	4,44
$R_2 = 74$ Ом	76,80	77,10	16,05	16,04	11,99
$R_2 = 73$ Ом	77,37	78,23	26,99	24,17	23,48
$R_2 = 70$ Ом	250,69	15,79	2,46	32,27	30,39

Висновки

Точність апроксимації дуже чутлива до відхилення опору навантаження однорідної лінії від узгодженого режиму і частково має немонотонний характер зміни, що ілюструє таблиця. Зона прийнятних значень максимальної відносної похибки має тенденцію до розширення в бік опору навантаження лінії, меншого від модуля хвильового опору лінії, при збільшенні довжини лінії, що еквівалентно збільшенню згасання сигналу в лінії.

1. Odabasioglu A., Celik M., Pileggi L.T. PRIMA: Passive Reduced-Order Interconnect Macromodeling Algorithm // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – Aug. 1998. – Vol. 17, No. 8, P. 645–654. 2. Kurbatov V.G., Oreshina M.N. Interconnect macromodelling and approximation of matrix exponent // Analog integrated circuits and signal processing. – July 2004 – Vol. 40, No.1. – P. 5–19. 3. Матвійчук Я.М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика. – Львів: Буд.ЛНУ ім. І. Франка, 2000. – 216 с. 4. Yuichi T. Positive real matrix approximation of multi-port networks using Fourier expansion method // IEIC Technical report. – Vol. 105, No.547, – P. 1–5. 5. Yu Q., Wing O. Computation models of transmission lines with skin effects and dielectric loss // IEEE Trans. Circuits Syst. I, – Feb. 1994 – Vol. 41. – P.107–118. 6. Воробкевич А.Ю. Про регулювання точності апроксимації параметрів лінійного багатополіуса / Доповіді спільної українсько-польської школи-семінару: "Актуальні проблеми теоретичної електротехніки: наука і дидактика". Соліна, 10–13 вересня 2000. – С. 68–71. 7. Буслова Н.В.,

Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С. *Электрические сети и системы*. – К.: Вища шк., 1986. – 584 с. 8. ЛаннэА.А. *Оптимальный синтез линейных электронных схем*. – М.: Связь, 1978. – 336 с. 9. Карни Ш. *Теория цепей. Анализ и синтез*. – М: Связь, 1973. – 368 с. 10. Гантмахер Ф.Р. *Теория матриц*. – М: Наука, 1988. – 552 с.

УДК 621.3.011.72

О.П. Гоголюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ТЗЕ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В СУЧАСНИХ КОМП’ЮТЕРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

© Гоголюк О.П., 2010

Розглянуто проблему дослідження електромагнітних перехідних процесів блока електропередачі “джерело живлення–силовий трансформатор–лінія електропередачі–автотрансформатор–навантаження”. Математичну модель системи сформовано в координатному базисі струмів і напруг віток електричних кіл, потікозчеплень і магнітних напруг віток магнітних кіл електромагнітних апаратів на підставі окремих моделей кожного елемента. Виконано комп’ютерне моделювання блока електропередачі у середовищі MATLAB/Simulink та наведено результати досліджень перехідних процесів.

In the paper problem of electromagnetic transient processes simulation for power transmission research is considered. Mathematical model of AC power transmission block “power source-power transformer-transmission-line-power autotransformer-load” is presented. The model of the system is created in coordinate basis of currents and voltages of electric circuit branches, flux linkages and magnetic voltages of magnetic circuits’ branches using separate models of each element. Computer simulation of transient processes in MATLAB/ Simulink environment is carried out and simulation results are presented.

Вступ

На сучасному етапі розвитку математичного моделювання та комп’ютерної техніки використання спеціалізованих комп’ютерних програм та середовищ (наприклад, ЕМТР, АТР, NETOMAC, PSCAD [1], MATLAB/Simulink [2], RE [12] тощо) є одним з основних засобів дослідження електричних систем. Необхідність практичного аналізу виникнення перенапруг під час вмикання, удару блискавки, ферорезонансу чи інших явищ, притаманних перехідним процесам, вимагає поповнення бібліотек математичних моделей елементів електроенергетичних та електромеханічних систем моделями з високим ступенем адекватності, які б мали можливість удосконалення та могли бути складовими складних систем такого типу.

Аналіз результатів останніх досліджень. У літературних джерелах наявні різноманітні математичні моделі елементів електричних систем [1, 3, 11–13]:

- джерел живлення (синхронних і асинхронних генераторів електричних станцій);
- силових трансформаторів та автотрансформаторів (придатних для дослідження високо-частотних та низькочастотних перехідних процесів) з врахуванням вихрових струмів, гістерезису, взаємної індуктивності між обвитками, індуктивностей розсіювання тощо;
- ліній електропередачі (із зосередженими чи розподіленими параметрами та врахуванням частотної залежності параметрів);
- елементів вузлів навантаження тощо.