

УДК 621.317.73

## ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АКТИВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЄМНОСТІ В НАПРУГУ

© Хома В. В., 1999

ДУ "Львівська політехніка"

*Сформульовано основні принципи проектування швидкодіючих перетворювачів "ємність-напруга". Приведено схеми стійких активних перетворювачів із три- та чотиризапискачевим способом підключення контрольованих об'єктів. Одержано вирази для інженерного розрахунку параметрів коректуючих елементів, які забезпечують необхідний запас стійкості та мінімізацію динамічних похибок у частотній та часовій областях.*

Широке використання операційних підсилювачів (ОП) у схемах вимірювальних перетворювачів комплексних опорів обумовлене можливістю забезпечення інваріантності до впливу таких дестабілізуючих факторів як паразитні параметри під'єднувальних проводів, комутуючих елементів тощо. Проте вимірювання ємності пов'язане із вирішенням низки проблем, що виникають через інерційність операційних підсилювачів. Насамперед, це забезпечення необхідного запасу стійкості операційної схеми перетворювача із змінними параметрами коефіцієнта зворотного зв'язку. Втрата стійкості становить найбільшу небезпеку при використанні ОП оскільки засіб вимірювання стає неприцездатним. Важливо шляхом пошуку компромісу між запасом стійкості та динамічними похибками як в часовій так і в частотній областях також оптимізувати динамічні властивості активних перетворювачів.

Найбільшого поширення набули схеми активних перетворювачів на базі ОП, коло зворотного зв'язку якого утворене зразковим резистором  $R_0$  та ємністю  $C_x$  контрольованого об'єкту [1, 2, 3]. Однак включення ємнісних об'єктів до зворотного зв'язку операційного підсилювача не бажане за рядом причин. По-перше, у цьому випадку треба запобігати насиченню виходу ОП, створивши нормальний режим за постійним струмом. По-друге, робота у режимі інтегратора не забезпечує високі динамічні якості перетворювача, особливо при великих сталих часу  $\tau_x = C_x R_0$ . По-третє, зворотна залежність вихідної напруги ОП від вимірюваної ємності вимагає додаткового оброблення результатів вимірювання.

З іншого боку включення ємності на вході ОП переводить операційну схему активного перетворювача "ємність-напруга" в клас диференціаторів. А як відомо, подібні пристрої мають схильність до само-

збудження і відзначаються незадовільними динамічними характеристиками через недостатню демпфіваність.

На динаміку вимірювальних перетворювачів впливають лише реактивні елементи, що здатні нагромаджувати електромагнітну енергію. Тому для спрощення аналізу стійкості та оцінки динамічних характеристик обмежимося розглядом ємностей без втрат ( $tg\delta_x \approx 0$ ).

Досліджуваний об'єкт підключається до приладу за допомогою під'єднувальних проводів, між якими виникає паразитна ємність. Це знижує точність особливо при вимірюванні малих ємностей. Як запобіжний засіб, підключення об'єкту вимірювання здійснюється екранованими проводами за так званою тризапискачевою схемою. Якщо екран проводів заземлити, то шунтуючий вплив входу приладу міжпровідною ємністю стане нехтовно малим, зате виникає паразитна ємність  $C_K$  "екран-провід" (рис. 1 а).

Якщо впливом ємності "екран-провід" збоку джерела тестової напруги (високий потенціал  $h$ ) можна зігнорувати, то ємність  $C_K$  іншого проводу (низький потенціал  $l$ ) визначає вхідний опір операційного підсилювача. За таких умов коефіцієнт зворотного зв'язку активного перетворювача описується виразом

$$\beta = 1 / (1 + sC_x R_0 + sC_K R_0).$$

Придатними для застосування у схемах перетворювачів "ємність-напруга" є лише операційні підсилювачі із однополюсною амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ). Це так звані скоректовані ОП, коефіцієнт підсилення без зворотного зв'язку яких описується рівнянням

$$A = \frac{1}{A_0} + j \frac{f}{f_T},$$

де  $A_0$  і  $f_T$  - відповідно коефіцієнт підсилення на постійному струмі та частота одиничного підсилення ОП.

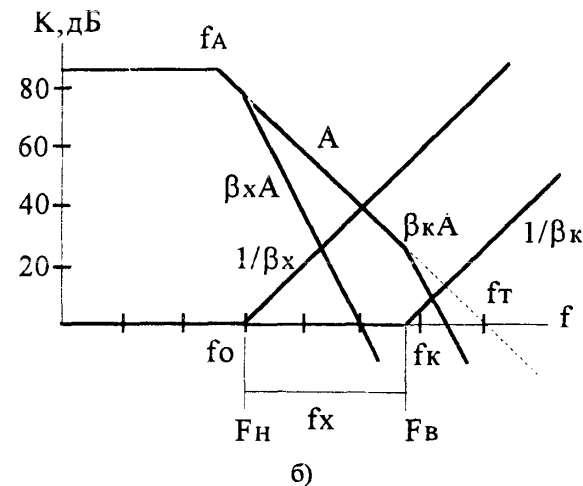
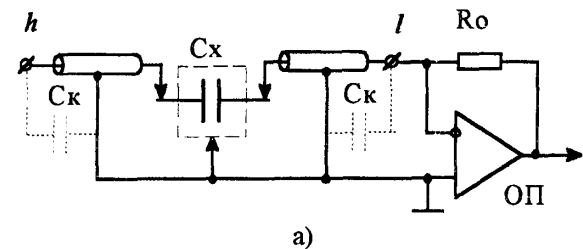


Рис. 1. Схема активного перетворювача «ємність-напруга» із тризатискачевою схемою підключення об'єкта (а) і його амплітудно-частотної характеристики (б).

На рис.1,б приведені АЧХ контурного підсилення  $|\beta A|$  активного перетворювача. Перший полюс, який створюється на частоті  $f_A = f_T/A_0$  самим ОП, залишається незмінним у процесі вимірювання на відміну від другого "плаваючого" полюса з частотою  $f_X = 1/2\pi R_0(C_X + C_K)$ . На вибраному піддіапазоні вимірювання ( $R_0 = const$ ) частота другого полюса залежить від значення вимірюваної величини і може змінюватися від деякої фіксованої верхньої частоти  $F_B = f_K = 1/2\pi R_0 C_K$  до частоти тестового сигналу  $F_H \approx f_0$ , оскільки на основних піддіапазонах вимірювання виконується таке співвідношення  $\max\{C_X\} \cdot R_0 \approx 1/2\pi$ . Наявність двох полюсів у області активних частот, тобто при  $|\beta A| > 1$ , недопустимо зменшує запас стійкості активного перетворювача. Виникає потреба у корекції коефіцієнта зворотного зв'язку, завдяки якій на границі активних частот вдалося б зменшити крутизну спаду контурного підсилення до 20 дБ/декада.

Простим та ефективним способом корекції є

використання у колі зворотного зв'язку ОП конденсатора  $C_Z$  паралельно із зразковим резистором (рис.2,а). Ємність  $C_Z$  створює нуль на частоті

$$f_z = 1/2\pi C_Z R_0, \quad (1)$$

зменшуючи на 20 дБ/декада крутизну спаду  $|\beta A|$ .

Вибір значення  $C_Z$  має відповідати двом вимогам:

- забезпечити достатній запас стійкості;
- мінімально знизити швидкодію.

Якщо частоту нуля вибрати рівною частоті  $f_1$ , що визначає границю інтервалу активних частот  $|\beta A| = 1$ , то запас стійкості за фазою активного перетворювача становитиме  $45^\circ$ . Частоту  $f_1$  можна легко розрахувати як координату точки перетину характеристик  $|A|$  і  $|1/\beta|$  (рис.2 б) таким чином:

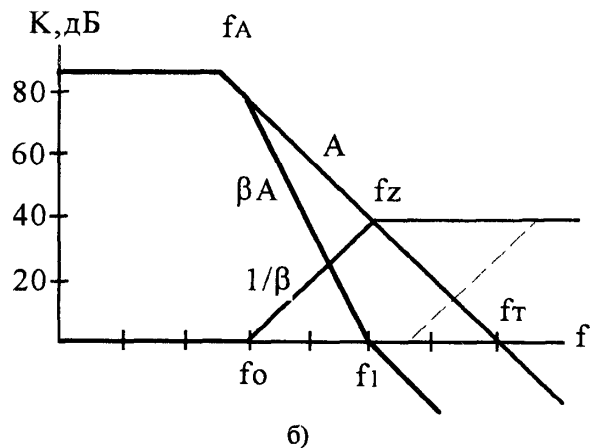
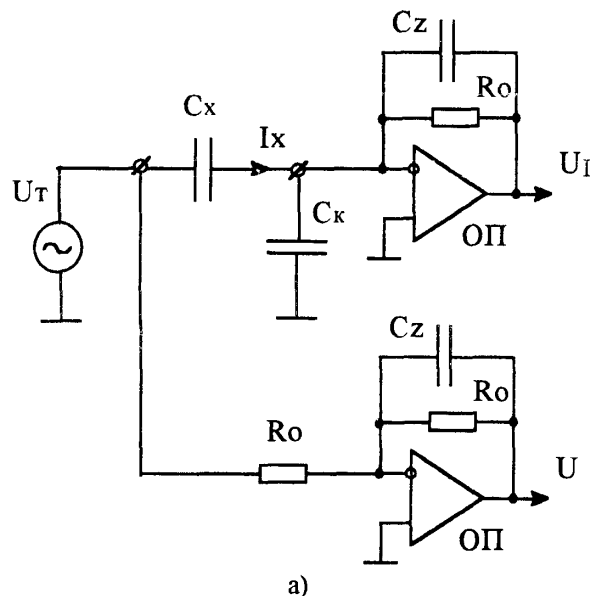


Рис. 2. Корекція "тризатискачевого" активного перетворювача "ємність-напруга" (а) і відповідні амплітудно-частотні характеристики (б).

$$f_1 = \sqrt{\frac{f_T}{2\pi(C_X + C_K)R_O}} \quad (2)$$

Із виразів (1) і (2) обчислюємо значення коректуючої ємності, що забезпечує 45-ти градусний запас стійкості

$$C_Z = \sqrt{\frac{C_X + C_K}{2\pi R_O f_T}} \quad (3)$$

Наприклад, для таких параметрів схеми як:  $f_T = 1$  МГц,  $R_O = 1$  МОм,  $C_X = 100$  пФ,  $C_K = 100$  пФ значення  $C_Z = 5,6$  пФ.

Із приведених на рис. 3 перехідних характеристик видно, що обчислене згідно (3) значення  $C_Z$  не є оптимальним з точки зору швидкодії пристрою. Як показують дослідження оптимальне значення коректуючої ємності приблизно у два рази більше, тобто

$$\text{opt}\{C_Z\} \approx \sqrt{\frac{2(C_X + C_K)}{\pi R_O f_T}} \quad (4)$$

Подальше збільшення ємності конденсатора  $C_Z$  недоцільне оскільки лише знижує швидкість активного перетворювача.

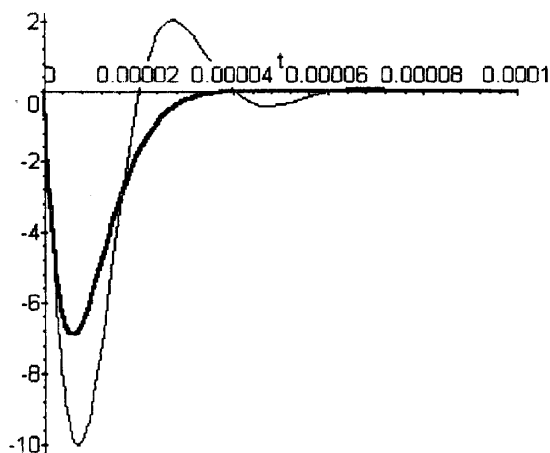


Рис. 3. Перехідні характеристики скоректованого активного перетворювача.

Корекцію активного перетворювача можна розглядати як утворення комплексної пасивної міри

$$Z_O = \frac{R_O}{1 + sC_Z R_O}$$

замість чисто активної  $R_O$ . Введення  $C_Z$  викликає додатковий фазовий зсув

$$\varphi = \arctg(2\pi f C_Z R_O)$$

та появу похибки

$$\delta_c = \frac{2\pi f_o C_Z R_O}{1 + 2\pi f_o C_Z R_O}$$

У схемі активного перетворювача (рис. 2 а) для компенсації фазового зсуву  $\varphi$  застосовується фазо-повертач на додатковому операційному підсилювачі. Умовою усунення похибки  $\delta_c$  є збіг сталих часу  $CR = C_Z R_O$ . Значення вимірюваної ємності пропорційне відношенню напруг

$$C_X = K \frac{U_I}{U}$$

Застосування активного перетворювача у вимірювальних пристроях прямої дії обмежується частотною похибкою, що виникає внаслідок зменшення коефіцієнта підсилення ОП із підвищенням частоти. Її порядок можна оцінити відношенням  $\delta_F \approx f/f_T$ . Разом з тим деякі прикладні задачі вимагають підвищення частоти тестового сигналу до 100 кГц-1 МГц, тобто практично до області частоти одиничного підсилення операційних підсилювачів загального призначення.

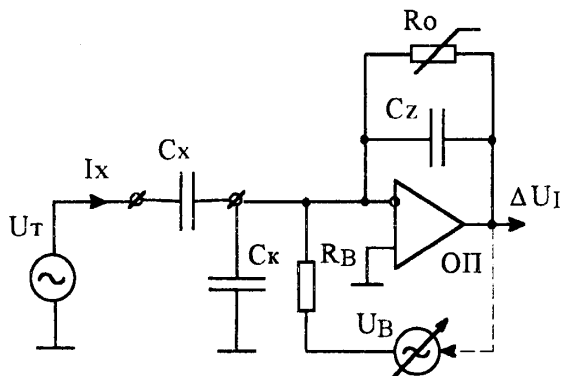


Рис. 4. Використання зворотного зв'язку для корекції похибок у частотній області.

Зменшення впливу частотних похибок та розширення частотного діапазону можливе при використанні активних перетворювачів "ємність-напруга" у структурі автокомпенсаційного пристрою (рис. 4). За допомогою стабільного зворотного перетворювача, що формує напругу  $U_B$ , та зразкового резистора  $R_B$  здійснюється компенсація струму  $I_X$  через вимірювальний об'єкт до настання повного балансу  $I_X = I_B = U_B / R_B$ . Переведення активного перетворювача "ємність-напруга" у режим нульової компенсаційно-мостової вимірювальної схеми дозволяє ефективно зменшити вплив як частотної похибки  $\delta_F$ , так і похибки фазового зсуву  $\delta_c$  [5]. Рівняння перетворення збалансованої схеми має вигляд

$$C_X = \frac{U_B}{2\pi f R_B U_T}$$

Вимірювання великих ємностей проводять за чотиризатискачевою схемою підключення (рис. 5). Використання окрім струмових ( $I_h, I_l$ ) двох додаткових потенціальних ( $U_h, U_l$ ) проводів запобігає впливу паразитного опору проводів та контактів на результати вимірювання. Особливістю чотиризатискачевої схеми підключення є відсутність шунтування вхідного опору ОП з боку ємності вхідного кабелю. Оскільки в утворенні полюса на характеристиці  $|\beta|$  бере участь лише контрольована ємність, то забезпечити стійкість активного перетворювача можна включенням резистора  $R_Z$  послідовно із  $C_X$  [4, 5].

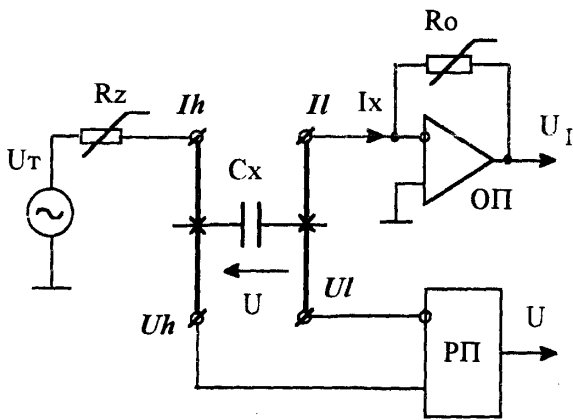


Рис. 5. Активний перетворювач ємності з чотири-затискачевою схемою підключення.

Резистор  $R_Z$  створює нуль на частоті  $f_z = 1/2\pi C_X R_Z$  і припиняє спад коефіцієнта зворотного зв'язку на рівні  $R_Z/R_O$ . При виборі значення  $R_Z$  також виходять із міркувань забезпечення достатнього запасу стійкості та мінімального часу встановлення. Розрахунки, аналогічні поведінці при одержанні виразу (4), дають змогу визначити опір резистора  $R_Z$  таким чином:

$$R_Z = \frac{R_O}{\sqrt{2\pi C_X R_O f_T}}$$

Оптимальне з точки зору швидкодії значення  $R_Z$  має бути приблизно у двічі збільшене, тобто

$$\text{opt}\{R_Z\} = \sqrt{\frac{2R_O}{\pi C_X f_T}} \quad (5)$$

Треба зауважити, що введення резистора  $R_Z$  не погіршить точності вимірювання, якщо на виході активного перетворювача використовується логометричний пристрій, який здійснює обробку відношен-

ня сигналів  $U_l/U$ .

На завершення відзначимо, що у широкодіапазонних вимірювачах може використовуватися п'ятизатискачева схема з чотирьох екранованих проводів із заземленням екрану, яка поєднує властивості 3- та 4-затискачевих схем. У цьому випадку перевагу слід надавати способу корекції АЧХ за допомогою паралельного конденсатора  $C_Z$ , оскільки нуль створюваний введенням послідовного резистора  $R_Z$  не може компенсувати полюс, утворений ємністю кабелю. Негативний вплив згаданої ємності  $C_K$  на стійкість перетворювача позначається при невиконанні умови  $f_z \leq f_K/10 = 1/20\pi C_K R_O$ .

Виходячи із сказаного, можна рекомендувати таку схему проектування швидкодіючих активних перетворювачів "ємність-напруга":

- вибирати як вихідні такі схеми включення досліджуваних ємнісних об'єктів, які забезпечують роботу пристрою у режимі диференціювання [2, 3, 4];

- розробити заходи щодо забезпечення необхідного запасу стійкості - при 3- і 5-затискачевій схемі корекцію здійснювати паралельним конденсатором  $C_Z$ , а при 4-затискачевій схемі - послідовним резистором  $R_Z$ ;

- оптимізувати у часовій області динамічні характеристики перетворювачів, що володіють необхідним запасом стійкості, обчислюючи значення коректуючих елементів  $C_Z$  і  $R_Z$  за виразами (4) і (5);

- для зменшення динамічних похибок у частотній області при підвищених вимогах до швидкодії доцільно включати активні перетворювачі до складу автокомпенсаційних пристроїв.

1. Гаврилюк М. А., Соголовский Е. П. "Электронные измерители CLR-параметров. Львов: Вища школа, 1978. - 134 с. 2. А.С. № 734041 (СССР). Преобразователь CLR-параметров двухполюсников. // М. А. Гаврилюк, Е. П. Соголовский, Е. В. Походьло. Бюл. № 18, 1992. 3. Патент № 18438 (Україна). Перетворювач комплексних опорів і порвідності в напругу. // В. В. Хома. Бюл. № 6, 1997. 4. Агамалов Ю. Р., Бобылев Д. А., Кнеллер В. Ю. Измеритель-анализатор параметров комплексных сопротивлений на основе персональной ЭВМ. / Измерительная техника № 4, 1996. С. 56-60. 5. А.С. № 1734041 (СССР). Преобразователь CLR-параметров двухполюсников. // М. А. Гаврилюк, Е. В. Походьло, В. В. Хома. Бюл. № 18, 1992.