

РАДІОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.375 026:681 327

В.Я. Василюк, В.І. Шклярський
Національний університет “Львівська політехніка”

ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГА-СТРУМ ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ СТРУМУ В КОМПЛЕКСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

© Василюк В.Я., Шклярський В.І., 2012

Наведено основні області застосування перетворювачів напруга–струм (ПНС) та вимоги до їх параметрів. Розглянуто характерні особливості реалізації ПНС при комплексному (індуктивно-активному) характері навантаження. Запропоновано класифікацію ПНС відповідно до різних класифікаційних ознак. Визначено подальші шляхи дослідження ПНС з комплексним навантаженням.

Ключові слова: перетворювач напруга–струм, класифікація, комплексне навантаження, швидкодія, точність, стійкість.

In this paper is given major areas of application voltage to current (VTC) converters and the requirements their settings. The characteristic features of VTC converters in the complex (inductively-active) nature of load. The classification of VTC converters according to different classification criteria to proposed. Defined further ways of learning the VTC converters with a complex load.

Key words: voltage-current converter, classification, complex loads, converter speed, accuracy and stability.

Вступ. Різноманітність завдань, що ставляться перед сучасною схемотехнікою, вимагає перетворення сигналів напруги у відповідні сигнали струму з великою точністю, стабільністю та швидкодією [1]. Функціональні особливості окремих пристроїв та систем, а також потужний розвиток цифрової техніки передбачають формування на своїх виходах малопотужного сигналу напруги керування, яка в подальшому повинна перетворитися на струм навантаження за допомогою ПНС. Навантаження ПНС має комплексний (в більшості випадків активно індуктивний) характер. Сигнали керування можуть мати різну форму, частоту та амплітуду, які змінюються в широких межах, що накладає відповідні вимоги до реалізації таких ПНС.

Застосування ПНС, основні параметри. Відповідно до використання ПНС змінюються вимоги до його параметрів та схем реалізації, тому вимоги щодо параметрів перетворювача напруга-струм потрібно розглядати із прив'язкою до особливостей його застосування. Якщо ПНС використовується для передавання інформації по лінії зв'язку ЛЗ, то для точного формування інформаційного сигналу в навантаженні він формується у вигляді струму [1, 2], що дає змогу суттєво зменшити вплив електричних завад при розузгодженні джерела та приймача (рис.1). Зокрема, таке застосування використовують у вимірювальних приладах, що опрацьовують інформацію віддаленого джерела сигналу, де ПНС навантажені на високоомну двопровідну лінію передавання інформації [3, 4].

Лінію зв'язку у вигляді „струмової петлі” зазвичай використовують у різноманітних вимірювальних пристроях, де виконується перетворення сигналу напруги з виходу давача (температури, тиску, вологості тощо) на струм, що подається у лінію зв'язку [5–8]. Вимоги до ПНС, які

використовуються в таких випадках, не є надто жорсткими. Здебільшого ПНС такого типу повинні забезпечувати перетворення з точністю до 0,1 % за зміни опорів лінії у межах від одного до десяти кілоом [6, 8]. В окремих випадках у прецизійних вимірювальних приладах точність перетворення повинна бути дуже великою (максимальна похибка не має перевищувати 0,01 %) за значних змін вихідного струму (до 50-300 мА) [4]. Основною особливістю таких ПНС є заземлене навантаження та, як правило, однополярне живлення, яке вмикають через лінію передавання інформації [9].

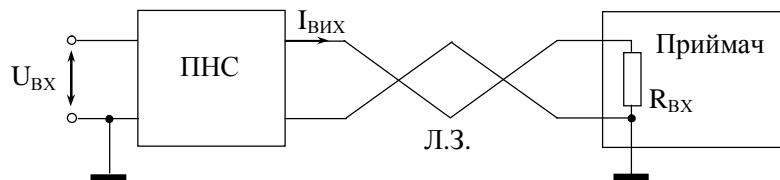


Рис. 1. ПНС для формування струму в лінії зв'язку

ПНС є складовою частиною аналогових перемножувачів (АП) сигналів напруг. У таких схемах ПНС найчастіше виконуються на основі схем диференційних підсилювачів з послідовним зворотним зв'язком за струмом [10–14]. Приклад ПНС на диференційному підсилювачі показано на рис. 2.

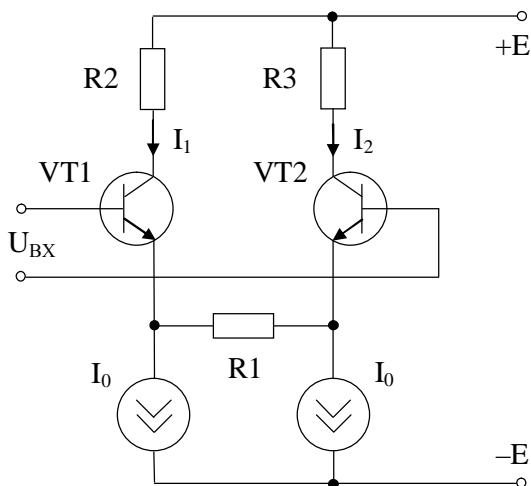


Рис. 2. ПНС на диференційному каскаді

У прецизійних АП висувуються особливі вимоги до лінійності, точності та швидкодії перетворення [12, 15, 16]. Наприклад, похибка перетворення прецизійних ПНС на диференційних каскадах не повинна перевищувати 0,025% при діапазоні вхідних напруг ± 10 В, а час встановлення сигналу на виході схеми з точністю 1% не перевищує 0,02 мкс [15, 16]. Такі ПНС повинні мати широкую смугу пропускання та велику швидкість наростання вихідного струму. Зазвичай навантаженням ПНС у АП є вихідний підсилювальний каскад з великим вхідним опором, який під час роботи схеми майже не змінюється, тому він значно не впливає на параметри ПНС.

ПНС використовують також за необхідності спряження традиційної схемотехніки напруг з приладами струмової схемотехніки [17]. Прикладом такого застосування є ПНС у аналого-цифровому перетворювачі (АЦП) відеосигналу, який працює в струмовому режимі [18]. У цьому випадку основними вимогами до ПНС є лінійність та швидкодія перетворення вхідного відеосигналу (сигналу напруги) у відповідний сигнал струму на виході для забезпечення струмового режиму роботи АЦП. У роботі [18] показано, що час встановлення сигналу струму на виході не повинен перевищувати 80 нс за зміни вхідного сигналу на 0,5 В. ПНС спряження працює на високих частотах із під'єднанням на виході наступного каскаду обробки сигналу. Потрібно врахувати, що, крім активної складової навантаження ПНС, матимемо паразитну ємнісну складову від входу наступного каскаду. Тому навантаження такого ПНС представляється RC-ланкою.

Ще одним випадком використання ПНС є спряження прецизійних виконавчих пристроїв (ВП) із джерелами керівного сигналу. ВП можуть бути різноманітні пристрої, за допомогою яких керівні сигнали перетворюються на відповідно інший фізичний еквівалент: механічний рух, магнітний, радіо- чи світловий потік певної спрямованої дії. Параметри цього перетворення визначаються параметрами струму, сформованого у ВП. Прикладом ВП є крокові двигуни або серводвигуни, що керуються струмами відповідної форми, формованими в обмотках двигунів. Для ПНС такі ВП являють собою індуктивне навантаження [19], а на великих частотах необхідно враховувати паразитну ємність обмоток, їх власну резонансну частоту, а також трансформаторні зв'язки між обмотками. Точність позиціонування таких ВП, як правило, визначається конструктивними особливостями приводу і становить 3 – 5% [20], а основним параметром цього типу ВП є час повороту ротора на заданий кут. Для сучасних швидкісних крокових двигунів час встановлення одного кроку не повинен перевищувати 50 мкс.

ПНС можуть використовуватися для формування еталонного струму в давачах неруйнівного контролю [21], характерна особливість яких полягає в тому, що необхідно формувати струм в індуктивному навантаженні однакової амплітуди в широкому частотному діапазоні (від сотень Гц до сотень кГц) [22]. Відповідне формування можна забезпечити лише з використанням глибокого від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) за струмом, сигнал якого формується на прецизійному резисторі, ввімкненому послідовно з індуктивним навантаженням. Такий принцип формування струму використовується в ПНС, навантажених на котушки відхилення (КВ) відхилювальних систем, які використовуються для формування растра на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) високої роздільної здатності в різноманітних прикладних телевізійних системах [23]. Прикладом таких систем можуть бути сканувальні телевізійні оптичні мікроскопи, в яких ЕПТ використовуються для освітлення досліджуваного мікрооб'єкта. Для формування растра в таких мікроскопах використовуються сигнали, амплітуда, частота та постійне зміщення яких змінюються в широких межах (до 10 разів). Такі функціональні можливості мікроскопа дають змогу формувати збільшене зображення досліджуваного мікрооб'єкта або його фрагмента без втрати роздільної здатності зображення.

На екрані такої ЕПТ формується світний растр, роздільна здатність якого може перевищувати 4000×4000 елементів розкладу зображення (діаметр такої ЕПТ до 60 мм, а діаметр світної плями не перевищує 10 мкм) [23]. Час та точність формування одного елемента зображення визначається відповідними параметрами встановлення струму у КВ. Зважаючи на кількість позицій електронного променя, ПНС повинен забезпечувати швидке перетворення керівної напруги на відповідний струм КВ з дуже великою точністю. Навантаження ПНС подамо у вигляді, що містить резистивну, індуктивну та ємнісну складову (рис. 3).

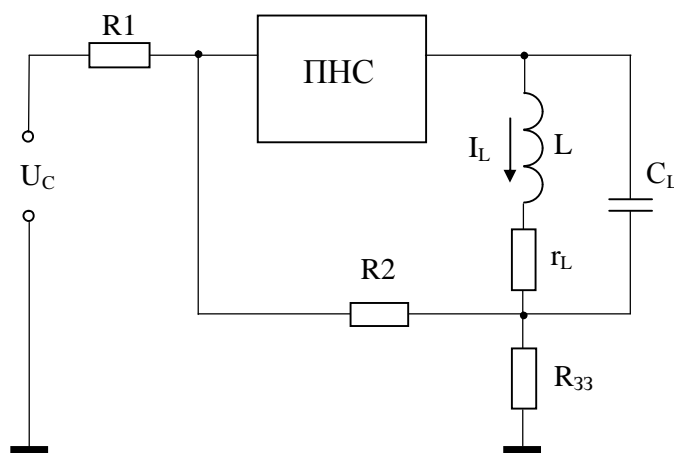


Рис. 3. ПНС для формування струму у КВ ЕПТ високої роздільної здатності

Оскільки за такого використання ПНС виникають найжорсткіші вимоги до його технічних параметрів, розглянемо його як крайовий випадок, за яким можна аналізувати усі можливі параметри та характеристики ПНС, що впливають на процес встановлення струму в комплексному навантаженні, яке має індуктивний характер в діапазоні середніх та високих частот.

У ПНС, виконаному відповідно до рис. 3, на точність формування струму в навантаженні впливають два види похибок: статичні та динамічні. Розглянемо статичні похибки ПНС, причиною яких є залежність параметрів ПНС від температури, старіння елементів, нестабільність джерел живлення, власних шумів тощо. Аналіз статичних похибок формування струму в навантаженні ПНС, проведений у [24], показує, що статична похибка δ ПНС, виконаного за паралельною схемою, визначатиметься похибкою, яка вноситься: нестабільністю порівнюючих резисторів R_1 та R_2 (δ_R); тепловим дрейфом напруги зміщення ($\delta_{U_{др}}$) і вхідних струмів ($\delta_{I_{др}}$); похибкою, нестабільністю коефіцієнта підсилення підсилювача без врахування дії ВЗЗ (δ_K); шумами ($\delta_{U_{ш}}$) і ($\delta_{I_{ш}}$), нестабільністю джерел живлення (δ_E) та нестабільністю резистора формування сигналу ВЗЗ R_{33} ($\delta_{R_{33}}$).

Оскільки окремі складові статичної похибки формування струму в КВ некорельовані [24], то загальна статична похибка визначається так:

$$\delta_I = \sqrt{\delta_R^2 + \delta_{U_{др}}^2 + \delta_K^2 + \delta_{U_{ш}}^2 + \delta_{I_{ш}}^2 + \delta_E^2 + \delta_{R_{33}}^2}.$$

Динамічні похибки формування струму в КВ залежать від частоти вхідного сигналу. Причиною динамічних похибок є залежності параметрів ПНС та параметрів комплексного навантаження від частоти [25]. У роботі [26] показано, що за комплексного навантаження динамічна похибка ϵ визначатиметься за рахунок: остаточної величини петльового підсилення ϵ_K , прямого проходження сигналу ϵ_{II} та вхідної синфазної ємності ϵ_C . Сумарна динамічна похибка при цьому визначається як

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_K^2 + \epsilon_{II}^2 + \epsilon_C^2}.$$

Оскільки ПНС побудований за схемою підсилювача постійного струму із глибоким ВЗЗ за струмом, сигнал якого формується прецизійним резистором, ввімкненим послідовно з навантаженням, то необхідно додатково враховувати такі параметри: загальний коефіцієнт підсилення підсилювача без урахування дії зворотного зв'язку K , коефіцієнт зворотного зв'язку ПНС β та коефіцієнт передавання G . Частотні властивості перетворювача характеризуються частотою зламу F_p амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) ПНС на рівні -3 дБ та верхньою граничною частотою F_t , що відповідає координатам перетину кривої АЧХ із віссю частот. Швидкодія ПНС характеризується часом встановлення струму в навантаженні із заданою динамічною точністю t_b , що визначається за часовою залежністю сумарної динамічної похибки перетворювача. Стійку роботу ПНС з комплексним навантаженням за негармонічних дій визначають запас стійкості за підсиленням V_M і запас стійкості за фазою Φ_M [26, 27].

Класифікація ПНС. У зв'язку з різноманітністю ПНС виділимо класифікаційні ознаки (рис. 4). За видом вхідного сигналу напруги керування ПНС можна поділити на функціональні та періодичні. Функціональні ПНС забезпечують формування струму у навантаженні за довільним, наперед не відомим, законом зміни сигналу керування, а періодичні формують струми відповідно до виключно наперед заданого закону.

Відповідно до виду вхідного сигналу функціональні ПНС можуть бути дискретними, неперервними чи комбінованими. Керування дискретними функціональними ПНС здійснюється сигналом напруги сходячись зростаючої або сходячись спадної форми, неперервними функціональними ПНС – лінійними (наприклад, пилкоподібними) або нелінійними (наприклад, параболічними) сигналами, комбінованими функціональними – сигналом, що містить складові сигнали керування як дискретних функціональних, так і неперервних функціональних ПНС.

Ознаки класифікації

За видом вхідного сигналу

За зв'язком з блоком формування вхідного сигналу

За типом ВЗЗ

За способом введення ВЗЗ

За частотним діапазоном

За типом

За швидкістю встановлення струму в навантаженні

За точністю формування струму

За можливістю масштабування

За способом живлення

За способом підімкнення навантаження

За характером навантаження

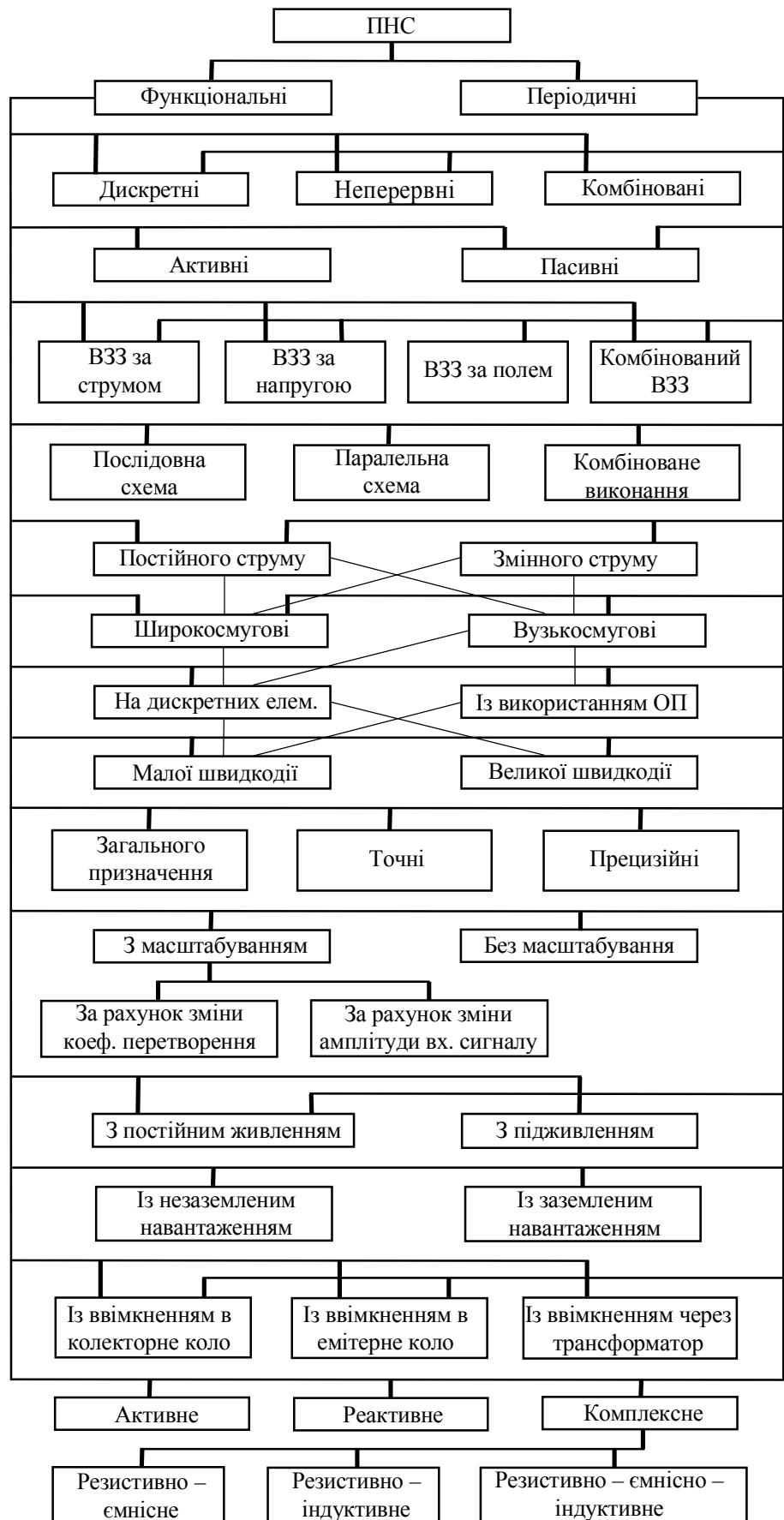


Рис. 4. Структура класифікації ПНС

Періодичні ПНС можуть бути дискретними чи неперервними. У дискретних періодичних на вхід подається сходитчасто зростаючий або сходитчасто спадний сигнал. На вхід неперервних періодичних ПНС надходить неперервний плавно змінний сигнал заданої форми.

За способом зв'язку ПНС з блоком формування сигналу (БФС) їх поділяють на активні та пасивні. Пасивні функціональні ПНС не мають зворотного зв'язку з БФС, який враховує час встановлення струму в навантаженні за негармонічного вхідного сигналу. Активні функціональні ПНС працюють з БФС в діалоговому режимі, за якого наступне миттєве значення вхідного сигналу формується після появи імпульсу дозволу, який відповідає встановленню струму в навантаженні із заданою точністю від попереднього миттєвого значення вхідного сигналу.

Важливим фактором, що забезпечує високу точність формування струму в навантаженні, є використання в ПНС від'ємного зворотного зв'язку. За типом формування сигналу зворотного зв'язку ПНС можуть виконуватися з ВЗЗ за струмом, ВЗЗ за напругою, ВЗЗ за полем та комбінованим ВЗЗ. Зворотний зв'язок за полем, а також комбінований ВЗЗ з урахуванням зворотного зв'язку за полем використовується виключно у періодичних неперервних ПНС [28].

За способом введення сигналу ВЗЗ перетворювачі можуть виконуватися за послідовною, паралельною чи комбінованою схемами. Послідовний ВЗЗ характеризується послідовним ввімкненням вхідного сигналу та сигналу зворотного зв'язку, що у вигляді напруги подається на другий (інвертуючий чи неінвертуючий) вхід ПНС. Перетворювач, побудований за паралельною схемою, характеризується паралельним ввімкненням вхідного сигналу та сигналу ВЗЗ, що у вигляді різниці двох сигналів подається на інвертуючий вхід.

Під час проектування схем ПНС основну увагу слід звернути на необхідність передавання на вихід постійної складової сигналу. За частотним діапазоном ПНС можна поділити на схеми постійного струму, у якій сигнал підсилюється у смузі частот від нуля до частоти одиничного підсилення, та схеми перетворювачів змінного струму, на виході яких відсутня постійна складова сигналу. За шириною смуги пропускання розрізняють широкосмугові та вузькосмугові ПНС. Невизначеність вхідної дії на функціональні перетворювачі, як правило, передбачає їх виконання за схемами постійного струму з великою смугою пропускання.

Для забезпечення широкої смуги пропускання ПНС виконуються на дискретних елементах, а у вузькосмугових ПНС чи перетворювачах, до яких не висувають жорстких вимог до ширини смуги пропускання та швидкодії, як правило, використовуються у вхідних каскадах операційні підсилювачі (ОП). Унаслідок цього за типом виконання ПНС можна поділити на перетворювачі, побудовані із використанням ОП та ПНС, побудовані виключно на дискретних елементах.

Під швидкодією ПНС будемо розуміти час, необхідний для встановлення струму в навантаженні із заданою точністю. За швидкістю встановлення струму у навантаженні розрізняють ПНС великої та малої швидкодії. В ПНС великої швидкодії форма струму в навантаженні практично повторює форму дискретного вхідного сигналу. В ПНС малої швидкодії потрібний значний час встановлення струму в навантаженні за стрибкоподібною зміни вхідного сигналу.

За точністю формування струму у навантаженні ПНС можна поділити на перетворювачі масового призначення, точні та прецизійні (використовуються у системах вимірювання). ПНС масового призначення забезпечують похибку формування струму, яка не перевищує 1% (визначається конструктивними особливостями або технічним завданням). Похибка точних ПНС досягає 0,01%, а у прецизійних ПНС похибка встановлення струму у навантаженні може бути значно меншою за 0,01% і сягати величини 0,002% (наприклад, у ПНС, які використовуються для прецизійного відхилення світного променя ЕПТ високої роздільної здатності).

В окремих випадках ПНС повинен забезпечувати можливість масштабування вихідного сигналу і, як правило, воно застосовується у функціональних ПНС, які забезпечують, наприклад, формування растра на екрані ЕПТ, розміри якого змінюються в дуже великих межах (до 10 разів) [23]. За можливістю масштабування перетворювачі поділяються на ПНС без масштабування та з масштабуванням, яке може забезпечуватися за рахунок зміни амплітуди вхідного сигналу або зміни коефіцієнта перетворення. При цьому змінити коефіцієнт перетворення ПНС можна, змінюючи

опори порівнювальних резисторів R1 або R2 або опір резистора, на якому формується сигнал ВЗЗ R_{ЗЗ} (див. рис. 3).

За способом живлення вихідного каскаду розрізняють ПНС з постійним живленням та схеми перетворювачів з підживленням. Останній спосіб використовується для зменшення часу перехідного процесу встановлення струму у ПНС з індуктивним навантаженням або комплексним навантаженням, що містить велике значення індуктивної складової.

За способом підімкнення навантаження розрізняють функціональні ПНС із заземленим чи незаземленим „плаваючим” навантаженням, ввімкненим в колекторне коло транзисторів вихідного каскаду та перетворювачі з навантаженням, ввімкненим в емітерне коло вихідного каскаду. В періодичних ПНС застосовується під’єднання заземленого чи незаземленого навантаження у колекторні або емітерні кола, а також заземленого навантаження до ПНС через узгоджувальний трансформатор.

За характером під’єданого до виходу навантаження ПНС можуть бути навантажені суто активним, ємнісним, індуктивним або комплексним опором, що передбачає його поділ на активно-ємнісний, активно-індуктивний або активно-ємнісно-індуктивний. Оскільки забезпечення формування струму в активному опорі являє собою тривіальне завдання, а суто ємнісне та суто індуктивне навантаження на практиці зустрічається вкрай рідко (особливо у прецизійних ПНС) основним завданням надалі буде розгляд ПНС із комплексним навантаженням.

Проектуючи ПНС або вибираючи вже готову схему, потрібно діяти у такій послідовності: проаналізувати закон зміни вхідного сигналу; з урахуванням робочих частот визначити характер навантаження ПНС; відповідно до вимог до точності встановлення струму у навантаженні та швидкодії ПНС вибрати тип ВЗЗ та спосіб його введення, відповідно вибрати тип виконання схеми, способи під’єднання навантаження та живлення ПНС, визначити необхідність зв’язку з БФС; проаналізувати вимоги до функціональності ПНС і в разі потреби забезпечити масштабування сигналу струму на виході ПНС. Після таких дій перевірити забезпечення вимог до точності та швидкодії, проаналізувати стійкість роботи ПНС і за необхідності, процедуру повторити із акцентуванням уваги на критичні умовах. Отже, класифікація ПНС допоможе заздалегідь передбачити і вирішити вузькі моменти проектування, що значно спростить вибір структури перетворювача.

Висновки. У роботі розглянуто особливості використання перетворювачів напруга-струм, які можуть виконуватися за схемами спряження джерела сигналу напруги з навантаженням, на диференційних каскадах та з використанням від’ємного зворотного зв’язку за струмом, сигнал якого формується на прецизійному резисторі, ввімкненому послідовно з навантаженням. Наведено основні параметри ПНС, а також аналітичні вирази для визначення статичних та динамічних похибок формування струму в комплексному навантаженні.

Запропоновано класифікацію перетворювачів напруга-струм, яка враховує параметри вхідного сигналу, характер використовуваного навантаження, структуру побудови та параметри перетворювача напруга-струм, способи під’єднання навантаження, способи введення зворотного зв’язку, способи живлення і можливість зв’язку з блоком формування вхідного сигналу. Класифікація дасть змогу спростити процес проектування перетворювачів напруга-струм та вибору схемотехнічних рішень за різних параметрів навантаження.

Аналіз відомих джерел показав, що недостатньо дослідженими залишаються питання формування струму в індуктивному навантаженні за негармонічних дій вхідного сигналу у разі зміни параметрів навантаження, параметрів резистора формування сигналу зворотного зв’язку, параметрів резистора, який забезпечує формування струму в навантаженні в аперіодичному режимі, стійкості роботи ПНС за різних параметрів навантаження та частот злому амплітудно-частотної характеристики.

1. Алексенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А.Г. Алексенко, Е.А. Коломбет, Г. И. Стародуб. – М.: Радио и связь, 1985. – 256 с. 2. Парамзин Ю. П.

Измерительный преобразователь напряжение-ток с незаземленной нагрузкой / Ю. П. Парамзин, А. Н. Петров // Приборы и системы управления. – 1990. – №7. – С. 19–21.

3. <http://cxem.net/promelectr/promelectr4.php> 4. Бородянский И. М. Линейный преобразователь напряжение-ток / И. М. Бородянский., В. Г. Галалу, П. В. Хало // Приборы и техника эксперимента. М: Академия Наук, 2003. – № 4 – С. 63 – 64. 5. Иванов Ю. И. Интерфейсы средств автоматизации: Учебное пособие. / Ю. И. Иванов, В. Я. Югай. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 252 с. 6. www.contravt.ru/?id=8769 7. Кузнецов Д. Н. Электронная система малого аэродинамического стенда градуировки и исследований импульсных термоанемометров / Д. Н. Кузнецов, В. Н. Лебедев, А. Н. Левченко. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк, 2010. – Вип. 171(19). – С. 111 – 117. 8. http://www.manotom-tmz.ru/media/konferen/RE_mnogopr.pdf 9. Мамиконян Б. М. Сравнительный анализ измерительных преобразователей напряжения в ток / Б. М. Мамиконян, Х. Б. Мамиконян, Е. Х. Назарян. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 2. – С. 232 – 238. 10. Pookaiyaudom S. An Integrable Precision Voltage-to-Current Converter with Bilateral Capability / S. Pookaiyaudom, W. Surakamponorn. // IEEE Journal of solid-state circuits, Vol. SC-13, № 3, 1978. – P. 411 – 413. 11. Гавлицкий А. И. Особенности схемотехники сверхнизковольтных прецизионных аналоговых перемножителей напряжения / А. И. Гавлицкий // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск “Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии”. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – № 5 (94). – С. 101–108. 12. <http://shemotehnika.sssu.ru/index.php/stat2005/206-stat-2005-002.html> 13. Старченко Е. И. Принципы проектирования низковольтных прецизионных аналоговых перемножителей напряжения / Е. И. Старченко // Альтернативные естественно возобновляющиеся источники энергии и энергосберегающие технологии, экологическая безопасность регионов: Выездная сессия секции энергетики отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН: Мат-лы сессии. – Ессентуки, 12–15 апреля 2008. В 2 ч. Ч. 2 / под ред. Я. Б. Данилевича. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2008. – С. 155–163. 14. Старченко Е. И. Схемотехника мостовых прецизионных преобразователей напряжение-ток / Е. И. Старченко, А. И. Гавлицкий // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: сб. материалов V Междунар. науч.-практич. семинара / под ред. Н. Н. Прокопенко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – С. 54 – 59. 15. Будяков А. С. Опыт разработки и моделирования аналоговых микросхем с предельными параметрами на базе российских биполярных технологий / А. С. Будяков, Н. Н. Прокопенко, Е. И. Старченко, Е. М. Савченко, С. Г. Крутчинский. // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006. Сборник научных трудов под общ. ред. А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2006. С. 206–211. 16. Дворников О. В. Импортозамещающие практические разработки и проекты ИС на базе радиационнотойкого АБМК / О. В. Дворников, В. А. Чеховский, С. Г. Крутчинский, Д. А. Щекин, И. П. Щербинин, Н. Н. Прокопенко, Е. И. Старченко // Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)”. Сборник трудов. Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006. – С. 200 – 205. 17. Зарукин А. И. Широкополосный преобразователь однополярного напряжения в ток с регулируемым коэффициентом преобразования / А. И. Зарукин // Схемотопологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Труды международной конференции КЛИН-2004. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. Т.4. – С. 58 – 60. 18. Maloberti, F. Design of a voltage-to-current converting interface for current-mode video signal processing applications / F Maloberti, R Rivoir. // Analog and Mixed IC Design, IEEE-CAS Region 8 Workshop on 13-14 Sep 1996. – P. 66 – 71. 19. Волович Г. И. Мощные источники регулируемого тока на операционных усилителях / Г. И. Волович // Современная электроника. – 2010. – № 5. – С. 36 – 39 20. <http://kazus.ru/shemes/showpage/0/843/1.html> 21. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев. / Под ред. В. В. Клюева. 2–е изд. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с. 22. Пат. 2373638 Российская Федерация, МПК Н 03 К 4 / 92. Способ формирования колоколообразных импульсов зондирования для ЭМА преобразователя и устройство для его осуществления / А.А. Подолян, А.Г. Протасов, С.Н. Лиго-

мина; опубл. 20.11.2009. 23. Шклярський В. І. Сканувальна телевізійна оптична мікроскопія: теорія та практика: монографія / В. І. Шклярський. – Видавництво Львівської політехніки. – 2010. – 456 с. 24. Шклярський В. І. Статическая погрешность формирования тока в катушках отклонения устройств позиционирования луча ЭЛТ / В. И. Шклярский // Вестник Львовского политехнического института. – 1988. – № 226 : Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем. – С. 94 – 98. 25. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – М.: Энергия, 1985. – 188 с. 26. Шклярський В. І. О динамической погрешности формирования тока в катушках отклонения устройств позиционирования луча ЭЛТ // Вестник Львовского политехнического института. – 1989. – № 236 : Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем. – С. 122 – 126. 27. Шклярський В. І. Обеспечение устойчивости устройств позиционирования луча прецизионных ЭЛТ / Г. А. Туркинов, В. И. Шклярский // Вестник Львовского политехнического института. – 1990. – № 245 : Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем. – С. 110 – 113. 28. Берман В. Р. Генераторы магнитной развертки электронно-лучевых индикаторов / В. Р. Берман, В. Т. Фролкин. – М.: Советское радио, 1976. – 320 с. 29. Туркинов Г. А. Высокостабильный усилитель отклонения для сканирующих устройств на прецизионных ЭЛТ / Г. А. Туркинов, В. И. Шклярский. – К., 1989. – 16 с. – Деп. в Укр. НИИНТИ 04.04.895, № 980. – Ук. 89. 30. Василюк В. Я. Моделювання перехідних процесів у перетворювачі напруга-струм з індуктивним навантаженням / В. Я. Василюк // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій “РТ-2010”: Матеріали VI Міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., 19 – 24 квітня 2010 р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010 – С. 53. (ДБ-Мікроскопія) (код КПКВ 2201040). 31. Лесков В. Г. Преобразователи напряжение-ток с повышенным динамическим диапазоном / В. Г. Лесков, Н. М. Фомин // Приборы и системы управления. – 1983. – № 7. – С. 18 – 19. 32. Влах Г. І. Компенсаційний перетворювач напруга-струм / Г. І. Влах, З. Р. Мичуда // Вісник ДУЛП – Автоматика, вимірювання та керування. – Л.: ДУЛП, 1996, № 305, С. 53 – 56. 33. Новиков О. П. Функциональные преобразователи напряжение-ток / О. П. Новиков // Приборы и системы управления. – 1990. – № 7. – С. 21 – 22. 34. Достал И. Операционные усилители / И. Достал. – М.: Мир, 1982. – 512 с. 35. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы / В. Л. Шило. – М.: Советское радио, 1979. – 368 с.