УДК 621.375.026:681 327

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

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ВСТАНОВЛЕННЯ СТРУМУ В ІНДУКТИВНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГА-СТРУМ ПРИ НЕГАРМОНІЧНІЙ ДІЇ

© *Василюк В.Я., Шклярський В.І., 2013*

V.Ya. Vasylyuk, V.I. Shkliarskyi
Lviv Polytechnic National University

DETERMINATION OF CURRENT SETTING TIME IN INDUCTIVE LOAD OF VOLTAGE-TO-CURRENT CONVERTER UNDER NON-HARMONIC INFLUENCE

ã Vasylyuk V.Ya., Shkliarskyi V.I., 2013

The paper presents analysis of problems dealing with the determination of the current setting time in the inductive component of the complex load of Voltage-to-current (VTC) converter under non-harmonic input influence. There is showed the change in the transient response and in the current setting time of the inductor on changing the VTC converter and complex load parameters. Expression to determine the current setting time of complex load of VTC converter at given level of dynamic error is presented. The estimation of dynamic error in determining the current setting time is presented in accordance with the time dependencies of transient responses of current setting in inductive load of VTC converter with complex load's and VTC's converters different parameters.

The mathematical model of precision VTC converter [1] with deflection system (DS) of cathode-ray tube (CRT) of television scanning optical microscope connected to its output has been designed and is presented as a complete equivalent circuit taking into account the resistance and parasitic capacitance of load. In accordance with the set conditions of raster formation on screen of such CRT, the control of converter is carried out by non-harmonic signal with variable shape, frequency, amplitude and displacement [2].

Precision VTC converter built as parallel circuit with a deep DS's current feedback, the signal of which is formed on the feedback resistor, which is connected in series with the load, has been studied. To ensure the aperiodic current setting the bypass resistor is connected to the load in parallel. While analyzing this circuit we're considering that: the static error due to instability of comparison resistors and feedback resistor is equal to zero, the cutoff frequency of VTC converter is higher than the resonant frequency of the load, and the error due to resistance of DS is compensated.

The mathematical model allows to carry out a complete theoretical study of precision VTC converter and to get expressions to determine the parameters upon certain conditions:

1) supply voltage of VTC converter is higher than the maximum voltage on the DS during the transition process;

2) amplifier is presented as one inertial circuit with real parameters: unity gain frequency f_B, gain amplifier K_0;

3) the resistance of DS r_L and parasitic capacitance C_L are taken into account at analysis;

4) considered that the feedback resistor R_{33} is non-inductive;

5) the current flowing through the resistor R2 relative to current of feedback resistor is very small and it is neglected.

Key words: voltage to current converter, complex load, inductive load, converter speed, accuracy, dynamic error.

Розроблено математичну модель прецизійного перетворювача напруга-струм (ПНС), навантаженого відхилювальною системою (ВС), яка забезпечує визначення часу встановлення струму у індуктивній складовій навантаження з необхідною точністю при заданій динамічній похибці. Наведені часові залежності встановлення струму у індуктивній складовій при зміні параметрів ПНС та комплексного навантаження.

Ключові слова: перетворювач напруга-струм, комплексне навантаження, індуктивне навантаження, швидкодія, точність, динамічна похибка.

Вступ

Основним завданням ПНС є прецизійне формування струму в індуктивному навантаженні виконуючих пристроїв відповідно до вхідного сигналу [1]. Зокрема прецизійні ПНС використовуються для формування струму у ВС електронно-променевих трубок (ЕПТ) високої роздільної здатності в різноманітних прикладних телевізійних системах [2]. Прикладом таких систем можуть бути сканувальні телевізійні оптичні мікроскопи (СТОМ), в яких ЕПТ використовуються для освітлення досліджуваного мікрооб'єкта. Формування растра в таких мікроскопах відбувається за допомогою сигналів, амплітуда, частота та постійне зміщення яких змінюються в широких межах (до 10 разів). Широкі функціональні можливості мікроскопа дозволяють формувати збільшене зображення досліджуваного мікрооб'єкта або його фрагмента без втрати роздільної здатності зображення.

На екрані ЕПТ мікроскопа 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) [2]. Час та точність формування одного елементу зображення визначається тривалістю встановлення струму у ВС. Зважаючи на кількість позицій електронного променя ПНС повинен забезпечувати швидке перетворення керуючої напруги у відповідний струм ВС з дуже великою точністю. У цьому випадку навантаження ПНС представляється у вигляді індуктивності, паразитної ємності та активного опору, де за формування відхилювального магнітного поля відповідає струм тільки індуктивної складової ВС.

Математична модель прецизійного перетворювача напруга-струм

Розроблено математичну модель ПНС, виконаного за паралельною схемою з глибоким від'ємним зворотним зв'язком за струмом, сигнал якого формується на резисторі зворотного зв'язку R_{33}, ввімкненого послідовно до комплексного навантаження ПНС [2]. Для забезпечення глибоко аперіодичного режиму вгамівності перехідного процесу встановлення струму у ВС паралельно до навантаження ввімкнено резистор шунтування $R_{Ш}$, резистори R1 та R2 використовуються для подання двох сигналів, що порівнюються, на вхід підсилювача (рис 1).

При побудові математичної моделі такого ПНС зроблено такі припущення:

1) напруга живлення вища за напругу на навантаженні під час перехідного процесу;

2) підсилювач представлено у вигляді інерційної ланки з двома параметрами: частотою одиничного підсилення f_B та коефіцієнтом підсилення підсилювача K_0 [3];

3) під час аналізу враховується активний опір ВС r_L та паразитна ємність C_L;

4) вважаємо, що резистор зворотного зв'язку R_{33} безіндуктивний;

5) струм, що протікає через резистор R2 відносно струму на резисторі зворотного зв'язку R_{33}, є дуже малим і ним нехтуємо.

Комплексний опір навантаження такого ПНС

$$Z_{BC}(w) = \frac{j \cdot w \cdot L + r_L}{-w^2 \cdot L \cdot C_L + j \cdot w \cdot (C_L \cdot r_L + \frac{L}{R_{Ш}}) + r_L + 1}. \quad (1)$$

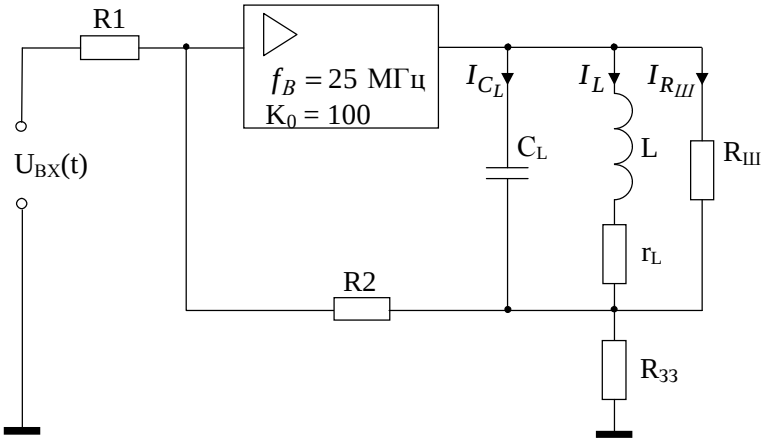

Рис. 1. Схема прецизійного ПНС для формування струму у ВС ЕПТ високої роздільної здатності

Відповідно до умови коефіцієнт передачі ПНС

$$K(w) = \frac{K_0}{1 + j \cdot w \cdot t}, \tag{2}$$

де $t = K_0 / f_B$ – стала часу підсилювача.

Приймаємо, що коефіцієнт передачі навантаження та опору зворотного зв'язку R_{33} відповідає коефіцієнту передачі подільника $R_{33}/(Z_{BC}(w) + R_{33})$, формуємо структурну схему ПНС (рис. 2).

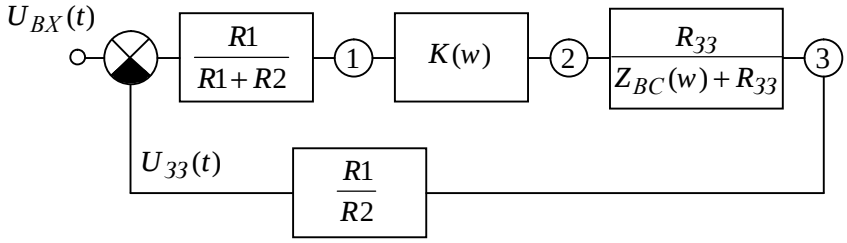

Рис.2. Структурна схема прецизійного ПНС для формування струму у ВС ЕПТ високої роздільної здатності

Для зручності побудови структурної схеми коефіцієнт передачі за рахунок резисторів R1 та R2 відносно сигналу на вході ПНС, вносимо в блок підсумовування вхідного сигналу $U_{BX}(t)$ і сигналу зворотного зв'язку $U_{33}(t)$ [4]. Тоді коефіцієнт передачі сигналу зворотного зв'язку

$$b = \frac{R1}{R1+R2} \cdot \frac{R1+R2}{R2} = \frac{R1}{R2}. \tag{3}$$

За допомогою такої структурної схеми знаходимо напругу у точці підсумовування $U_{П}(t)$ – сигнал похибки (точка 1), напругу на виході підсилювача $U_{ПД}(t)$ (точка 2) та напругу на резисторі зворотного зв'язку $U_{R_{33}}(t)$ (точка 3).

Для знаходження струму індуктивної складової навантаження ПНС переходимо до операторної форми за Лапласом із відповідною заміною $j \cdot w \to p$, та знаходимо напругу на ВС

$$U_{CB}(p) = U_{ПД}(p) - U_{R_{33}}(p), \tag{4}$$

де $U_{ПД}(p) = U_{BX}(p) \cdot K_{U_{ПД}}(p) = \dfrac{U_{BX}(p) \cdot R2/(R1+R2) \cdot K(p)}{1 + R1/(R1+R2) \cdot K(p) \cdot R_{33}/(Z_H(p) + R_{33})}$,

а $U_{R_{ЗЗ}}(p) = U_{BX}(p) \cdot K_{U_{R_{ЗЗ}}}(p) = \dfrac{U_{BX}(p) \cdot R2/(R1+R2) \cdot K(p) \cdot R_{ЗЗ}/(Z_H(p)+R_{ЗЗ})}{1+R1/(R1+R2) \cdot K(p) \cdot R_{ЗЗ}/(Z_H(p)+R_{ЗЗ})}$,

тут $K_{U_{ПД}}(p)$ та $K_{U_{R_{ЗЗ}}}(p)$ коефіцієнти передачі напруги у точках 2 та 3 відповідно (рис 2).

Визначимо зображення струм індуктивної складової ВС

$$I_L(p) = \frac{U_{BC}(p)}{Z_L(p)}, \tag{5}$$

де $Z_L(p)$ − сума реактивного опору індуктивності та активного опору ВС $j \cdot w \cdot L + r_L \to p \cdot L + r_L$.

Після підстановки та спрощень отримаємо вираз для знаходження зображення струму $I_L(p)$

$$I_L(p) = U_{BX}(p) \cdot \frac{K \cdot R2}{R_{ЗЗ} \cdot R1} \cdot \frac{q}{p^3 \cdot a + p^2 \cdot b + p \cdot c + d}, \tag{6}$$

коефіцієнти якого знаходяться із величин елементів ПНС та навантаження

$$a = L \cdot C_L \cdot t \qquad q = 1 \qquad b = L \cdot C_L \cdot (K+1) + t \cdot C_L \cdot r_L + t \cdot L/R_{П}$$

$$c = \left(C_L \cdot r_L + \frac{L}{R_{Ш}} \right) \cdot K + C_L \cdot r_L + t + t \cdot r_L/R_{П} + L/R_{П} \qquad d = r_L/R_{П} + \frac{r_L + R_{Ш}}{R_{Ш}} \cdot K + 1$$

при $R_{П} = \dfrac{R_{Ш} \cdot R_{ЗЗ}}{R_{Ш} + R_{ЗЗ}}$ $K = \dfrac{K_0 \cdot R1}{R1+R2}$

Критичним випадком при вхідному негармонічному сигналі буде реакція ПНС на одиничну сходинчату дію на вході, зображення якої за Лапласом $U_{BX}(p) = 1/p$. Часова залежність струму на індуктивній складовій матиме такий вигляд:

$$I_L(t) = \frac{K \cdot R2}{a \cdot R_{ЗЗ} \cdot R1} \left(A + B \cdot e^{p_1 \cdot t} + C \cdot e^{p_2 \cdot t} + D \cdot e^{p_3 \cdot t} \right), \tag{7}$$

де p_1, p_2 та p_3 − корені полінома $p^3 \cdot a + p^2 \cdot b + p \cdot c + d$; A, B, C та D − коефіцієнти розкладу на доданки виразу (6), які знаходяться із коренів полінома

$$A = -\frac{q}{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3} \qquad D = -\frac{(p_2 - p_1) \cdot q}{p_3 \cdot [(p_2 - p_1) \cdot (p_1 p_2 - p_2 p_3) - (p_3 - p_1) \cdot (p_1 p_3 - p_2 p_3)]}$$

$$C = \frac{p_1 \cdot A - (p_3 - p_1) \cdot D}{p_2 - p_1} \qquad B = -A - C - D$$

Динамічну похибку встановлення струму в індуктивній складовій ВС можна записати [5]

$$e_I(t) = -\frac{I_{L_{ІД}}(t) - I_{L_Д}(t)}{I_{L_{ІД}}(t)} \cdot 100\%, \tag{8}$$

де $I_{L_Д}(t)$ − часова залежність дійсного значення струму в індуктивності, $I_{L_{ІД}}(t)$ − ідеальне значення струму індуктивності ВС при врахуванні статичних похибок.

Вплив параметрів ПНС та ВС на час встановлення струму

Для визначення впливу параметрів ПНС на час встановлення струму в індуктивній складовій навантаження побудуємо часові залежності при зміні відношення резонансної частоти ВС $f_P = \dfrac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{C_L \cdot L}}$ до частоти зрізу підсилювача $f_З = \dfrac{1}{t}$ (рис. 3) при коефіцієнті підсилення підсилювача $K = 100$.

З рис. 3 видно, що обмежена смуга пропускання є причиною появи коливного перехідного процесу встановлення струму у ВС, зумовленого компенсацією підсилення за рахунок впливу ВЗЗ на частотах, близьких до $f_З$.

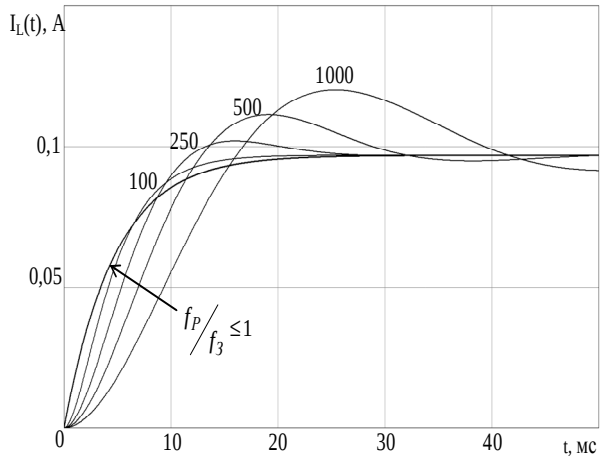

Рис. 3. Вплив обмеженої смуги пропускання ПНС на час встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження

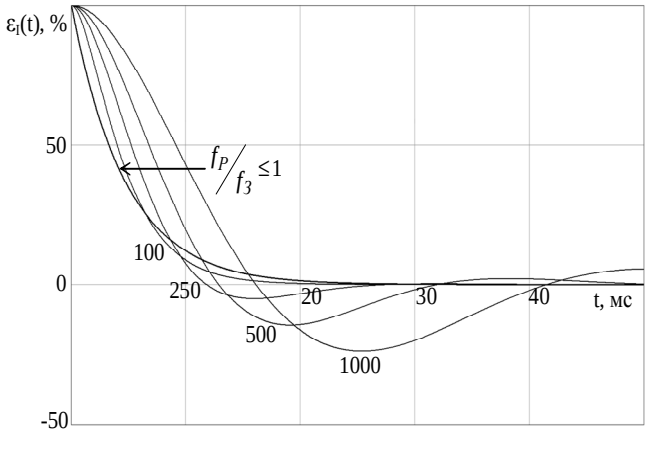

Рис .4. Динамічна похибка встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження при зміні смуги пропускання ПНС

Аналіз $I_L(t)$ та $I_L(w)$ показав, що зміна коефіцієнта підсилення підсилювача K_0 при постійній частоті одиничного підсилення $f_B = const$ та забезпеченні малої статичної похибки встановлення струму у індуктивності ($d_{K_0 \neq \infty} = 0{,}1\%$) за рахунок кінцевого значення підсилення підсилювача $K_0 \neq \infty$

$$d_{K_0 \neq \infty} = \frac{J_c}{K_0 \cdot (R_{Ш} + r_L) \cdot R_{33} \cdot R1 + R_c} \cdot 100\%, \qquad (9)$$

де $J_c = (r_L \cdot R_{Ш} + R_{33} \cdot R_{Ш} + r_L \cdot R_{33}) \cdot (R1 + R2)$

при глибокому зворотному зв'язку не впливає на час встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження ПНС, а впливає лише на $d_{K_0 \neq \infty}$.

При $f_P / f_З \leq 1$ час встановлення струму у навантаженні визначається сталими часу індуктивності $t_L = L / R_{П}$ та ємності $t_C = C_L \cdot r_L$ ВС.

Для відображення цього впливу побудуємо графічні залежності (рис. 5–8).

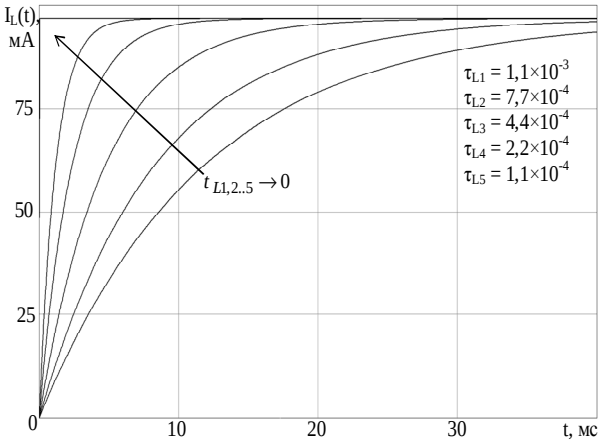

Рис. 5. Вплив індуктивності навантаження ПНС на час встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження

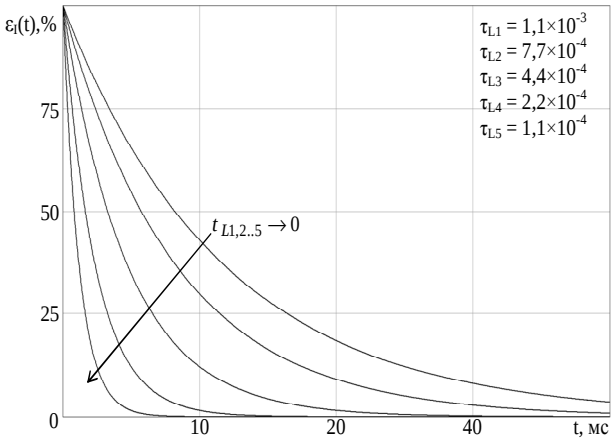

Рис. 6. Динамічна похибка встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження при різних значеннях індуктивності навантаження

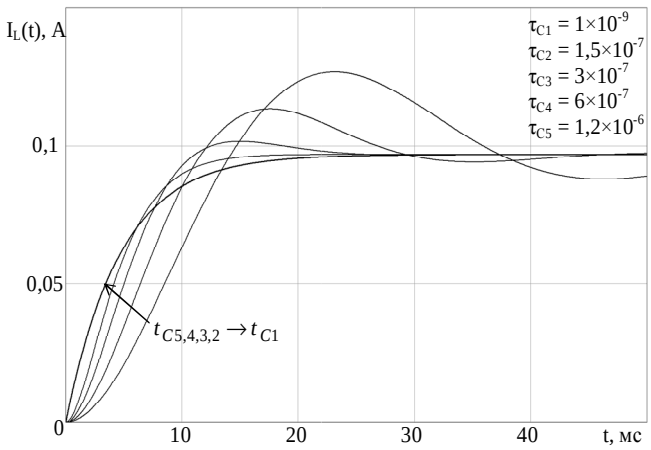

Рис. 7. Вплив ємності навантаження ПНС на час встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження

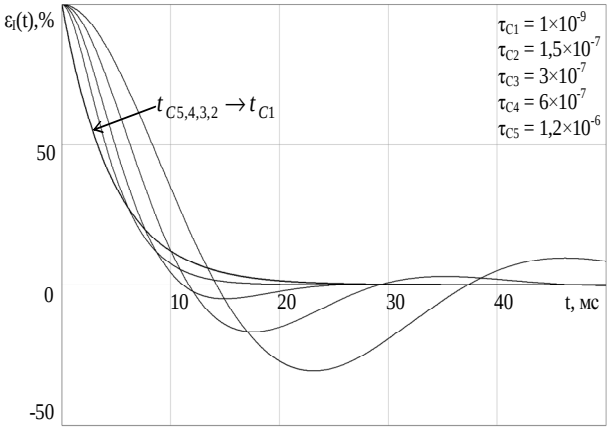

Рис. 8. Динамічна похибка встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження за різних значень ємності навантаження ПНС

Висновки

Розроблено математичну модель прецизійного перетворювача напруга-струм виконаного за паралельною схемою навантаженого відхилювальною системою ЕТП високої роздільної здатності. Виведений загальний вираз часової залежності встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження та вираз динамічної похибки встановлення струму, який забезпечує можливість знаходження часу встановлення струму в індуктивному навантаженні перетворювача напруга-струм із заданою точністю.

Наведені графіки перехідних процесів встановлення струму в індуктивній складовій комплексного навантаження при зміні параметрів перетворювача напруга-струм та навантаження. Встановлено, що у разі зменшення смуги пропускання перетворювача (при $f_P / f_З > 1$) відбувається швидке збільшення часу встановлення струму, а перехідний процес має коливний вгамівний характер. Також до збільшення часу встановлення призводить збільшення індуктивності та значне збільшення паразитної ємності відхилювальної системи (при $R_Ш / Z_{BC}(f_P) > 1$).

Визначено динамічні похибки встановлення струму в індуктивному навантаженні перетворювача, з яких видно, що зменшення часу встановлення струму із заданою точністю можна досягти зменшенням індуктивності та збільшенням добротності відхилювальної системи за забезпечення відношення $f_P / f_З \le 1$.

1. Василюк В. Я. Перетворювач напруга-струм як засіб формування струму в комплексному навантаженні / В.Я. Василюк, В.І. Шклярський // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2012. – № 738 : Радіоелектроніка та телекомунікації. – С. 48–56. 2. Шклярський В. І. Сканувальна телевізійна оптична мікроскопія: теорія та практика: монографія / В.І. Шклярський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2010. – 456 с. 3. Ковалёв Л. П. Шаговое развертывание изображений в электронно-лучевых индикаторах / Л. П. Ковалёв. – М. : Энергия, 1974. – 72 с. 4. Картер Б. Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини; пер. с англ. А.Н. Рабодзея. – М. : Додэка-XXI, 2011. – 544 с. 5. Шклярский В. И. О динамической погрешности формирования тока в катушках отклонения устройств позиционирования луча ЭЛТ // Вестник Львов. политехн. ин-та.: Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем. – 1989. – № 236 – С. 122 – 126.