АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОРІВНЕВИХ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ ЧАСТОТИ ІЗ ЗМЕНШЕНОЮ НЕРІВНОМІРНІСТЮ ВИХІДНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Проаналізовані граничні можливості генератора затримки, який є адаптованим до дворівневих цифрових синтезаторів частоти, що керуються двома кодами.

The limit possibilities of generator's delay have been analysed in this paper. This device have been adapted to bilevel digital synthesizers controlled by dual codes.

1. ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Дворівневі цифрові синтезатори частоти (ДЦСЧ) використовують в радіо- та провідному зв'язку, локації, навігації, робототехніці, моделюванні і т.д. Застосування генераторів затримки (керованих ліній затримки) у ДЦСЧ дозволяє істотно зменшити нерівномірність їх вихідних імпульсів. Це стосується як ДЦСЧ побудованих за традиційним принципом – з використанням одного керуючого коду [1], так і удосконалених – з використанням двох керуючих кодів [2–5]. При цьому в обох випадках постає задача визначення граничних можливостей генератора затримки (ГЗ), що і є метою даного дослідження.

В роботі проаналізовані граничні можливості ГЗ, в основі якого є два масиви вимикачів струму, оскільки такі генератори (на відміну від генераторів, що використовують принцип подвійного інтегрування [6]) є адаптованими до ДЦСЧ, що керуються двома кодами [7].

2. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На рис.1 показана функціональна схема генератора затримки (а), та відповідні часові діаграми (б).

Лінійно змінна напруга V_R , що формується верхнім масивом вимикачів та конденсатором C_2 описується рівнянням (1):

$$V_{R} = -\frac{Y1 \cdot I_{0}}{C_{2}} \cdot (t - t_{0}), \qquad (1)$$

де I₀- інкремент зміни струму, створеного масивом вимикачів.

¹ Національний університет «Львівська політехніка»

¹⁸¹

Порогове значення напруги _{VT}, що створюється нижнім масивом вимикачів (рис.1 б) за період повторення тактових сигналів ЦСЧ – T, описується виразом (2).

$$V_{\rm T} = -\frac{(2^{\rm m} - {\rm U}) \cdot {\rm I}_0}{{\rm C}_1} \cdot {\rm T}, \qquad (2)$$

де m – кількість двійкових розрядів ДЦСЧ, U – поточне значення числа в регістрі Рг ДЦСЧ, C₁ – ємність конденсатора, що відноситься до нижнього масиву вимикачів.



Рис. 1. Функціональна схема генератора затримок (a) та часові діаграми його роботи (б)

В момент рівності V_T і V_R фіксується значення затримки t_3 , яке згідно (1) і (2) дорівнює:

$$t_{3} = \frac{C_{2}}{C_{1}} \cdot \frac{2^{m} - U}{Y1} T \cdot$$
(3)

Граничні можливості ГЗ визначаються різними факторами: неідеальністю елементів його схеми (рис.1), зв'язків між ними, паразитними ємностями. Серед цих факторів основним є неоднаковість значень C_1 і C_2 , що спричинена технологічними можливостями виготовлення мікросхем і впливом зовнішніх факторів [18, 19] (в ідеальному випадку

 $C_1 = C_2$ і $t_{\varsigma} = \frac{2^m - U}{Y_1} T$). Враховуючи це необхідно визначити, при якому співвідношенні $k_c = \frac{C_1}{C_2}$ роботу ДЦСЧ можна вважати задовільною. Ми

пропонуємо як критерй задовільної роботи синтезатора прийняти максимальну допустиму різницю між екстремальними значеннями часових інтервалів між вихідними імпульсами пристрою в одиницях періоду тактової частоти.

Для визначення зв'язку між k_c і зазначеним критерієм була створена імітаційна модель роботи ДЦСЧ з ГЗ, окремі результати використання якої наведені в табл. 1 – 3.

Таблиця 1

Результати імітаційного моделювання ДЦСЧ при m=20, Y1=15,Y2=100

	Часові інтервали [кількість Т]						
$k_{c} = \frac{C_{1}}{C_{2}}$	Вихід фазового акумулятора			Вихід генератора затримки			
	t ^{фа} вих _{тах}	t ^{фа} _{вих min}	$\Delta t^{\varphi a}_{_{BUX}}$	$t_{BUX_{max}}^{\Gamma 3}$	$t_{B \mu X}^{\Gamma 3}_{min}$	$\Delta t_{\text{вих}}^{\text{гз}}$	
1	2	3	4	5	6	7	
1,0000	69899	69898	1,0000	69898,4000	69898,4000	0,0000	
1,0100	69899	69898	1,0000	69898,4040	69898,3940	0,0100	
1,0200	69899	69898	1,0000	69898,4080	69898,3880	0,0200	
1,0300	69899	69898	1,0000	69898,4120	69898,3820	0,0300	
1,0400	69899	69898	1,0000	69898,4160	69898,3760	0,0400	
1,0500	69899	69898	1,0000	69898,4200	69898,3700	0,0500	
1,0600	69899	69898	1,0000	69898,4240	69898,3640	0,0600	
1,0700	69899	69898	1,0000	69898,4280	69898,3580	0,0700	
1,0800	69899	69898	1,0000	69898,4320	69898,3520	0,0800	
1,0900	69899	69898	1,0000	69898,4360	69898,3460	0,0900	
1,1000	69899	69898	1,0000	69898,4400	69898,3400	0,1000	
1,1100	69899	69898	1,0000	69898,4440	69898,3340	0,1100	
1,1200	69899	69898	1,0000	69898,4480	69898,3280	0,1200	
1,1400	69899	69898	1,0000	69898,4560	69898,3160	0,1400	
1,1500	69899	69898	1,0000	69898,4600	69898,3100	0,1500	
1,1600	69899	69898	1,0000	69898,4640	69898,3040	0,1600	
1,1700	69899	69898	1,0000	69898,4680	69898,2980	0,1700	
1,1800	69899	69898	1,0000	69898,4720	69898,2920	0,1800	
1,1900	69899	69898	1,0000	69898,4760	69898,2860	0,1900	
1,2000	69899	69898	1,0000	69898,4800	69898,2800	0,2000	

	Часові інтервали [кількість Т]						
$k_{c} = \frac{C_{1}}{C_{2}}$	Вихід фазового акумулятора			Вихід генератора затримки			
	t ^{фа} вих _{тах}	$t^{\varphi a}_{_{BUX}{}_{min}}$	$\Delta t^{\varphi a}_{\scriptscriptstyle \rm BMX}$	$t_{\scriptscriptstyle B\! \prime X}^{\scriptscriptstyle \Gamma 3}{}_{\scriptscriptstyle max}$	$t_{\scriptscriptstyle B\! {\rm I}\!{\rm X}}^{\rm \Gamma 3}{}_{\rm min}$	$\Delta t_{\scriptscriptstyle BHX}^{\scriptscriptstyle \Gamma3}$	
1	2	3	4	5	6	7	
1,0000	850	849	1,0000	849,5478	849,5478	0,0000	
1,0100	850	849	1,0000	849,5533	849,5433	0,0100	
1,0200	850	849	1,0000	849,5588	849,5388	0,0200	
1,0300	850	849	1,0000	849,5642	849,5342	0,0300	
1,0400	850	849	1,0000	849,5697	849,5297	0,0400	
1,0500	850	849	1,0000	849,5752	849,5252	0,0500	
1,0600	850	849	1,0000	849,5807	849,5207	0,0600	
1,0700	850	849	1,0000	849,5862	849,5162	0,0700	
1,0800	850	849	1,0000	849,5916	849,5116	0,0800	
1,0900	850	849	1,0000	849,5971	849,5071	0,0900	
1,1000	850	849	1,0000	849,6026	849,5026	0,1000	
1,1100	850	849	1,0000	849,6081	849,4981	0,1100	
1,1200	850	849	1,0000	849,6135	849,4935	0,1200	
1,1300	850	849	1,0000	849,6190	849,4890	0,1300	
1,1400	850	849	1,0000	849,6245	849,4845	0,1400	
1,1500	850	849	1,0000	849,6300	849,4800	0,1500	
1,1600	850	849	1,0000	849,6355	849,4755	0,1600	
1,1700	850	849	1,0000	849,6409	849,4709	0,1700	
1,1800	850	849	1,0000	849,6464	849,4664	0,1800	
1,1900	850	849	1,0000	849,6519	849,4619	0,1900	
1,2000	850	849	1,0000	849,6574	849,4574	0,2000	

Результати імітаційного моделювання ДЦСЧ при m=20, Y1=1234, Y2=234

В таблицях 1–3. використані такі позначення: $t_{\text{вих}_{max}}^{\varphi a}$ і $t_{\text{вих}_{min}}^{\varphi a}$ – екстремальні значення часових інтервалів між вихідними імпульсами фазового акумулятора (ФА); $\Delta t_{\text{вих}}^{\varphi a} = t_{\text{вих}_{max}}^{\varphi a} - t_{\text{вих}_{min}}^{\varphi a}$; $t_{\text{вих}_{max}}^{r_3}$ і $t_{\text{вих}_{min}}^{r_3}$ – екстремальні значення часових інтервалів між вихідними імпульсами ГЗ; $\Delta t_{\text{вих}}^{r_3} = t_{\text{вих}_{max}}^{r_3} - t_{\text{вих}_{min}}^{r_3}$.

$k_{c} = \frac{C_{1}}{C_{2}}$	Часові інтервали [кількість Т]						
	Вихід фазового акумулятора			Вихід генератора затримки			
	t ^{фа} вих _{тах}	t ^{фа} вих _{тіп}	$\Delta t^{\phi a}_{\scriptscriptstyle { m BUX}}$	t ^{гз} _{вих max}	t ^{гз} вих _{min}	$\Delta t_{\scriptscriptstyle BHX}^{\scriptscriptstyle \Gamma3}$	
1	2	3	4	5	6	7	
1,0000	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0100	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0200	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0300	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0400	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0500	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0600	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0700	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0800	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,0900	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1000	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1100	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1200	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1300	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1400	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1500	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1600	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1700	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1800	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,1900	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	
1,2000	1000	1000	0,0000	1000,0000	1000,0000	0,0000	

Результати імітаційного моделювання ДЦСЧ при m=20,Y1=1000, Y2=1048576

Виконані дослідження показали, що незалежно від кількості розрядів $\Phi A - m$ і значень керуючих кодів Y1 і Y2 існує однозначна залежність між значеннями k_c і $\Delta t_{\text{вих}}^{r_3}$ (табл. 1, 2):

$$\Delta t_{\text{BMX}}^{\Gamma 3} = k_c - 1. \tag{4}$$

Винятком є тільки випадки коли відношення $\frac{2^m - Y2}{Y1}$ є цілим числом, оскільки при цьому імпульсна послідовність на виході ФА є рівномірною (табл. 3).

Наступний аналіз здійснимо виходячи з припущення, що робота ЦСЧ вважається задовільною, якщо $\Delta t_{\text{вих}}^{\Gamma_3} \leq 0,1 \cdot \text{T}$, що відповідає обмеженню $k_c \leq 1,1$. Метою аналізу є визначення максимального значення тактової частоти ДЦСЧ – $f_{ao} = \frac{1}{T}$, при якій робота синтезатора є задовільною. Для цього використаємо наступні міркування:

для наступних розрахунків зручніше використовувати рівняння
 (2), оскільки воно, на відміну від рівняння (1), включає змінні Т і m;

– невикористання рівняння (1) не зменшує загальності розрахунку, оскільки, виходячи з принципу роботи ГЗ номінальні значення C_1 і C_2 повинні бути однаковими;

– значення напруги живлення ГЗ – $V_{cc}\,\,\varepsilon\,\, \varphi$ іксованою величиною;

– значення керуючих кодів Y1 і Y2 повинно задовольняти умові $Y1 < 2^m - Y2$.

Відповідно з принципом роботи ФА мінімальне значення поточного коду в регістрі Рг визначається виразом:

$$U_{\min} \ge 2^m - Y1. \tag{5}$$

Максимальне, за абсолютною величиною, значення V_T , згідно (2) і (5), дорівнює:

$$\left| V_{T_{max}} \right| = \frac{(2^m - U_{min}) \cdot I_0}{C_1} T = -\frac{Y_1 \cdot I_0}{C_1} T.$$
 (6)

Наступний розрахунок, доцільно вести для найбільших значень Y1, які відповідно з обмеженням Y1 < 2^m – Y2, досягаються при Y2 = 0 і дорівнюють

$$Y1_{max} = 2^m - 1. \tag{7}$$

Отже, максимально можливе значення V_T визначається так:

$$\left| \mathbf{V}_{\mathrm{T}_{\mathrm{max}}} \right| = \frac{(2^{\mathrm{m}} - 1) \cdot \mathbf{I}_{0}}{\mathrm{C}_{1}} \mathrm{T} .$$
 (8)

Значення $|V_{T_{max}}|$ не повинно перевищувати значення напруги живлення V_{cc} . Для спрощення можна прийняти:

$$\frac{2^{m} \cdot I_{0}}{C_{1}} T = V_{cc}$$
(9)

Значення I₀ визначаються залежно від кількості розрядів $\Phi A - m$. Орієнтуючись на приклади використання для побудови ГЗ сучасних технологій, наведених в роботі [6], можна прийняти, що для $V_{cc} = 3\hat{A} - I'_0 = 1\hat{A}$ при m=4. Очевидно, що при незмінному значенні V_{cc} і збільшені m (m \geq 4) струм I₀, повинен визначатись рівнянням:

$$I_0 = \frac{I'_0}{2^{m-4}}.$$
 (10)

Із (8), (9) випливає:

$$f_{BX} = \frac{1}{T} = \frac{2^4 \cdot I'_0}{C_1 \cdot V_{cc}}$$
(11)

При $V_{cc} = 3B$ і $I'_0 = 1_MA$ будемо мати:

$$\begin{split} C_1 &= 10\pi\Phi \rightarrow f_{_{BX}} \approx 533M\Gamma\mu; \\ C_1 &= 100\pi\Phi \rightarrow f_{_{BX}} \approx 53,3M\Gamma\mu; \\ C_1 &= 1\mu\Phi \rightarrow f_{_{BX}} \approx 5,33M\Gamma\mu; \\ C_1 &= 10\mu\Phi \rightarrow f_{_{BX}} \approx 0,533M\Gamma\mu. \end{split}$$

Якщо неоднаковість значень ємностей конденсаторів C₁ і C₂ (спричинена технологічними можливостями виготовлення мікросхем і впливом зовнішніх факторів) є на рівні $\Delta C = |C_1 - C_2| \le 10 \pi \Phi$, то умова k_c ≤ 1 ,1 виконується при тактовій частоті ЦСЧ, що не перевищує 53,3МГц. Зрозуміло, що цій частоті повинна відповідати швидкодія усіх складових частин ЦСЧ.

Подібна методика розрахунку може бути використана також для визначення граничних можливостей ГЗ і ЦСЧ загалом при урахуванні неоднаковості значень I_0 в обох масивах вимикачів ГЗ.

3. ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано структуру для вирівнювання вихідних імпульсних послідовностей дворівневих цифрових синтезаторів частоти за допомогою симетричної структури керованого пристрою затримки, що забезпечує потрібну точність часової затримки для структур, що забезпечують керування кроком зміни вихідної частоти.

Проаналізовано граничні можливості ГЗ, в основі якого є два масиви вимикачів струму, оскільки такі генератори (на відміну від генераторів, що використовують принцип подвійного інтегрування) є адаптованими до ДЦСЧ, що керуються двома кодами.

1.Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications– Jouko Vankka Boston ; London : Kluwer Academic Publishers. – 2001. – pp. 216. 2. Пат. 2257669 Российская Федерация, МПК⁷ Н 03 L 7/18 С1 Цифровой синтезатор сигналов / Константинов Г.А., Рябов И.В.; заявитель и патентообладатель Марийский гос. техн. унив. – № 2004104137/09; заявл. 12.02.04; опубл. 27.07.05, Бюл. №21. 3. Стахів Р.І. Дворівневий синтезатор частоти //

Р.І. Стахів В.М. Максимович, // Вісник "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2002. – №

468. – С. 29–34. 4.Стахів Р.І. Цифровий дворівневий синтезатор частоти на накоплювачі з мультиплексуванням керуючих кодів / Р.І. Стахів, В.М. Максимович // Контроль і управління в складних системах: VII міжнар. наук.–техн. конф., 8–11 жовтня 2003р.: тези доп. – Вінниця, 2003. – С.102. 5. Стахів Р.І. Конвеєрний дворівневий синтезатор частоти / Р.І. Стахів, В.М. Максимович // Збірник наукових праць "Комп'ютерні технології друкарства". – Львів: Українська академія друкарства, 2008 – №19 – С.129–138. 6. Chen H. C. A low–jitter phase–interpolation DDS using dual-slope integration / Н. С. Chen, J. S. Chiang // IEICE Electronics Express, 2004. – Vol.1. – № 12. – рр. 333–338. 7. Стахів Р.І. Цифровий дворівневий синтезатор на накопичувачі на двох комбінаційних суматорах, з усуненням нерівномірності вихідних імпульсів / Р.І. Стахів, В.М.Максимович // Збірник наукових праць "Комп'ютерні технології друкарства, 2005 – №13 – С. 227–233.