

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РІВНЯ КОМПЛЕКСНО - СПОЛУЧЕНОГО ВІДГУКУ СИГНАЛУ ПІСЛЯ ДОДАТКОВОГО СТРОБУВАННЯ ВІДЛІКІВ АНАЛОГО - ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У статті запропоновано аналітичний розрахунок рівня комплексно-сполучених компонент сигнальних відгуків по виходу фільтру додаткового стробування (ФДС) відліків аналогового - цифрового перетворювача.

Копієвська В.С. Аналитический расчет уровня комплексно – соединенного сигнального отклика сигнала после дополнительного стробирования откликов аналого-цифрового преобразователя. В статье предложен аналитический расчет уровня комплексно- соединенных компонент сигнальных отзвон по выходу фильтра дополнительного стробирования (ФДС) отсчетов аналого-цифрового преобразователя.

V. Kopiyevska Analytical calculation level of complex-united response signal after additional strobing. In the article the analytical calculation of level complex united component of alarm reviews on the filter output of the additional strobing (FDS) of ADC counting out is offered.

Ключові слова: стробування відліків, I/Q-демодуляція, комплексно-сполучена складова, амплітудно - частотна характеристика.

Актуальність досліджень. Потреба у застосуванні заводо захищених засобів зв'язку спонукає до пошуку відповідних за властивостями методів цифрової обробки сигналів. Серед таких методів важливе місце займають квадратурні демодулятори (I/Q-демодулятори), що мають покращені частотно-селективні властивості при обробці відліків аналого-цифрових перетворювачів (АЦП).

При аналізі останніх досліджень [1, 2] були виявлені переваги та недоліки окремих методів і з їх врахуванням розроблений новий аналітичний розрахунок рівня комплексно-сполученого відгуку сигналу по виходу фільтру додаткового стробування відліків АЦП. На сьогоднішній день запропонований в [1] метод проріджування потоку цифрових відліків сигналів за допомогою їхнього додаткового стробування дозволяє зменшити рівні бічних пелюсток амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) операції додаткового стробування з метою підвищення заводо захищеності засобів зв'язку. Це досягається використанням попередньої цифрової I/Q-демодуляції відліків аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в режимі „ковзного вікна”, що дозволяє формувати квадратурні складові напруг в кожному з квадратурних півканалів. Крім того, метод [1] усуває негативний вплив на форму АЧХ різного за величиною постійного зсуву „нуля” АЦП у квадратурних півканалах.

Разом з тим, як свідчать результати моделювання, наявність I/Q-демодуляторів у квадратурних трактах хоча й пригнічує бічні пелюстки АЧХ операції додаткового стробування відліків АЦП, але на рівень комплексно-сполученої складової (КСС), обумовленої неідентичністю коефіцієнтів передачі квадратурних півканалів, не впливає.

Метою статті є розробка аналітичного розрахунку рівня комплексно-сполученого відгуку сигналу по виходу фільтру додаткового стробування відліків АЦП [1].

На першому етапі синтезу методу було здійснене математичне моделювання в пакеті *Mathcad* процесу функціонування фільтру додаткового стробування відліків АЦП (рис. 1) у разі обробки одночастотного гармонійного сигналу за процедурою [1]. У цьому випадку 8-відлікова ковзна I/Q-демодуляція здійснювалася згідно з виразами [3]:

$$\begin{aligned}\hat{U}_k^s &= U_k - 11U_{k+2} + 15U_{k+4} - 5U_{k+6}; \\ \hat{U}_k^c &= 5U_{k+1} - 15U_{k+3} + 11U_{k+5} - 5U_{k+7},\end{aligned}\quad (1)$$

де U_k – напруга k -го відліку АЦП у квадратурному півканалі, \hat{U}_k^c , \hat{U}_k^s – штучно сформовані у I/Q-демодуляторі відліки квадратурних складових напруг сигналів, а довжина стробу була задана $N=8$ відліків АЦП.

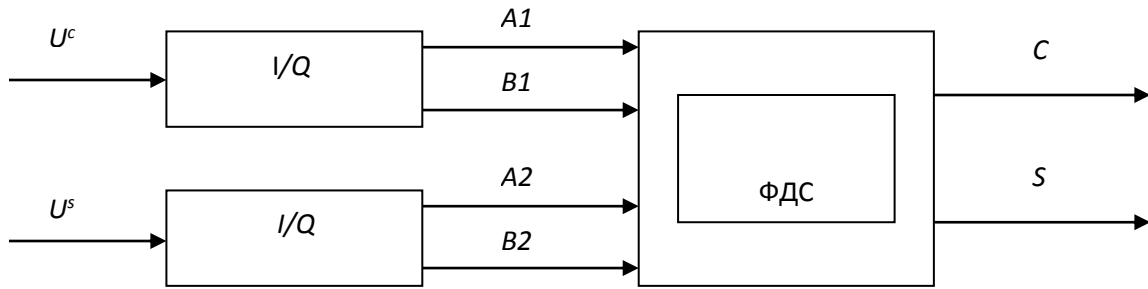


Рис. 1. Структурна схема фільтру додаткового стробування відліків АЦП, де $C = \square(A1 + B2)$, $S = \square(B1 - A2)$

При моделюванні квадратурних складових напруг сигналів на виході АЦП квадратурних півканалів застосовувалися вирази:

$$\begin{cases} U_s^c = a \cos(\Omega \tau f_0 \tau + \varphi) + \Delta^c, \\ U_s^s = K a \sin(\Omega \tau f_0 \tau + \varphi) + \Delta^s, \end{cases} \quad (2)$$

де U_s^c , U_s^s - напруги сигналів на входах квадратурних півканалів у s -му відлікові АЦП; a - амплітуда сигналу; K - відносний квадратурний розбаланс коефіцієнта підсилення; f , φ - частота та початкова фаза сигналу, τ - період дискретизації АЦП, Δ^c , Δ^s - постійний зсув напруги сигналу у косинусному та синусному квадратурних півканалах.

Шляхом зміни номіналу частоти сигналу на вході математичної моделі утворювався набір масиву відгуків ФДС для різних частот. При цьому нарощування номіналу частоти здійснювалося з інтервалом в $1/20$ від ширини головної "пелюстки" АЧХ ФДС, що визначається за виразом $\partial f = (N\tau)^{-1}$, де N - кількість відліків, над якими здійснюється операція додаткового стробування.

За допомогою зазначеного масиву формувалася графік модуля АЧХ ФДС для методу [1], а також АЧХ для ФДС, обробка сигналу в якому здійснюється без попередньої I/Q- демодуляції (рис. 2), згідно з виразами [4]:

$$\begin{aligned} W_y^c &= \sum_{s=y \cdot N}^{(y+1)N-1} \{ U_i^c \cdot \cos(\Omega \tau f_0 \tau) + U_i^s \cdot \sin(\Omega \tau f_0 \tau) \} \\ W_y^s &= \sum_{s=y \cdot N}^{(y+1)N-1} \{ U_i^s \cdot \cos(\Omega \tau f_0 \tau) - U_i^c \cdot \sin(\Omega \tau f_0 \tau) \} \end{aligned}$$

$$C_y = W_{1y}^c + W_{2y}^s, \quad S_y = W_{1y}^s - W_{2y}^c. \quad (3)$$

де $U_i^{c(s)}$ - квадратурні складові сигналу на виході АЦП; $y = \overline{0, Y-1}$ - порядковий номер стробу; f_0 - центральна частота ФДС, τ - період дискретизації в операції аналого-цифрового перетворення.

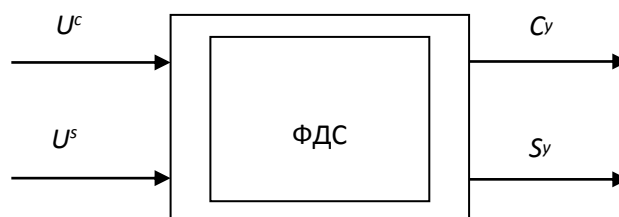


Рис. 2. Структурна схема фільтру додаткового стробування відліків АЦП без попередньої I/Q-демодуляції

Оскільки у методі [1] виконання попередньої I/Q -демодуляції за виразами (1) призводить до зростання величини відгуку ФДС у 64 рази порівняно з ФДС (3), для співставлення АЧХ обох різновидів ФДС, що моделювалися, здійснювалося помноження модуля відгуку (3) на число 64.

На рис. 3 в якості прикладу наведені графіки АЧХ обох варіантів ФДС для випадку наявності постійного зсуву напруг сигналів $\Delta^c = 200$ і $\Delta^s = -500$ та відсутності розбалансу коефіцієнту підсилення у квадратурних півканалах ($K = 1$).

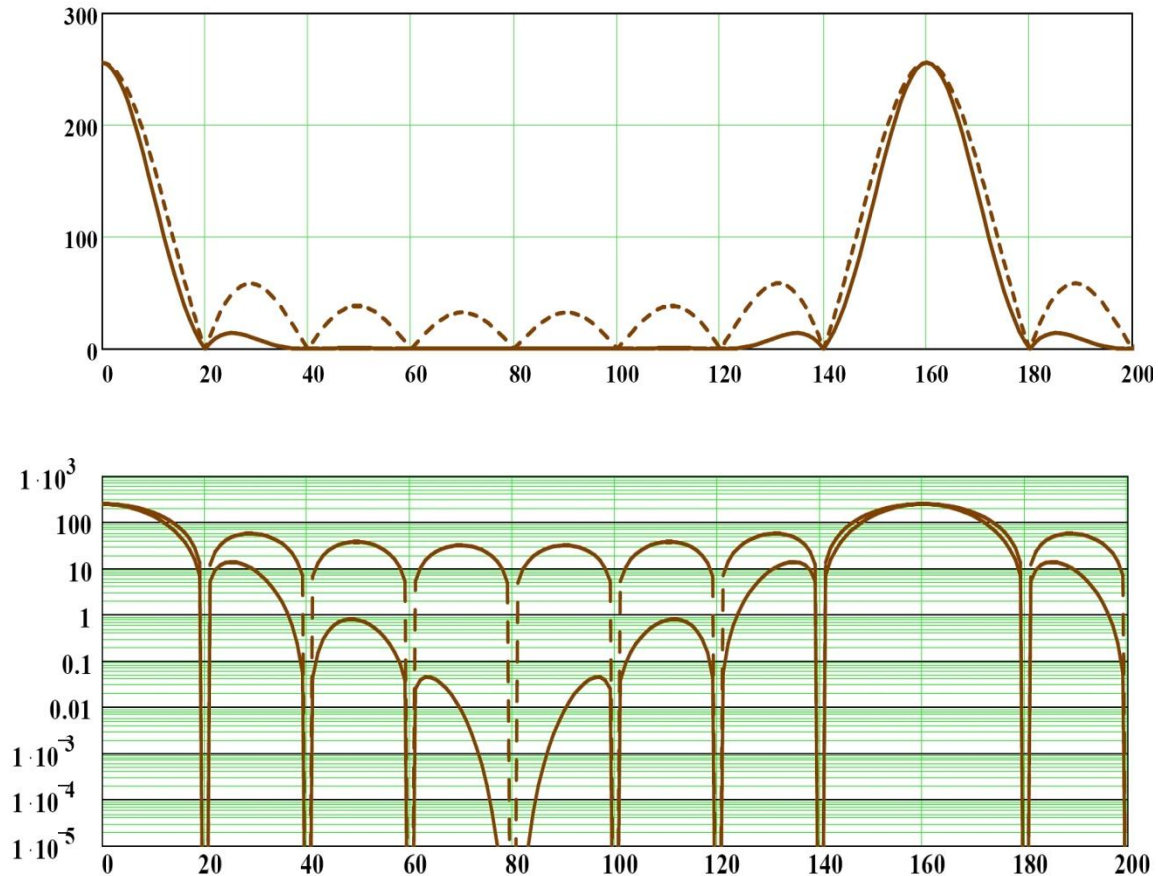


Рис. 3. АЧХ ФДС за умови неідентичного постійного зсуву нуля АЦП в квадратурних півканалах

Уздовж горизонтальної вісі відкладено порядковий номер частоти сигналу, а по вертикалі – напругу модуля відгуку ФДС у квантах АЦП. Суцільною лінією відображено АЧХ ФДС за методом [1], а штриховою – для ФДС, алгоритм функціонування якого описано виразами (3) [4]. Наведені графіки свідчать про відсутність КСС, що мала б бути в позиції 80 за частотною шкалою. Цей факт підтверджує, що постійний зсув напруг сигналів, різний у квадратурних півканалах, не впливає на АЧХ ФДС обох з досліджених типів.

З метою аналізу впливу квадратурного розбалансу коефіцієнту підсилення на рівень КСС амплітуда сигналу в косинусному квадратурному півканалі була задана рівною 1, а в синусному півканалі - поступово збільшувалася від 1 з інтервалом 0,25, що досягалося відповідною зміною величини K .

Таким чином, імітувалися різні значення амплітуд сигналів у квадратурних півканалах, що еквівалентно неідентичності коефіцієнтів підсилення аналогових квадратурних трактів. Зазначена неідентичність, як свідчать результати моделювання, призводить до появи КСС не тільки у відгуках ФДС (3), а й у випадку використання методу [1]. При цьому відносний рівень КСС з урахуванням 64-кратної різниці у величинах відгуків для обох варіантів ФДС є однаковим. Рівні ж решти бокових пелюсток АЧХ у випадку ФДС без I/Q -демодуляції вищі, ніж у альтернативного ФДС, наведеного на рис. 1.

Таким чином, результати моделювання підтвердили факт, що наявність I/Q -демодуляторів пригнічує рівень бокових пелюсток АЧХ, але не впливає на величину комплексно-спряженого відгуку, викликаного неідентичністю квадратурних півканалів.

Вибіркові результати моделювання для розбалансу коефіцієнту підсилення у квадратурних півканалах K , обмеженого величиною 5, наведені в табл. 1.

За вказаних умов було встановлено, що рівень КСС при співпаданні частоти основної компоненти сигналу з максимумом головної пелюстки АЧХ може бути описаний лінійною залежністю

$$t = (K - 1) \cdot 0,25, \quad (4)$$

де K – відношення коефіцієнтів підсилення квадратурних півканалів.

Зокрема, для $K = 1,25$ рівень КСС в табл. 1 дорівнює 1 кванту АЦП (рис. 4), для $K = 2$ маємо $t = 4$, при $K = 3$ величина $t = 8$ і т.д. (див. табл. 1).

Таблиця 1

Результати математичного моделювання

Амплітуда сигналу (кванти АЦП)	Коефіцієнт квадратурного розбалансу амплітуд K (рази)	Після нормування на 64		Без нормування	
		Рівень основного відгуку ФДС (кванти АЦП)	Рівень КСС (кванти АЦП)	Рівень основного відгуку ФДС (кванти АЦП)	Рівень КСС (кванти АЦП)
1	1	8	0		0
	1,25	9	1	576	64
	1,5	10	2	640	128
	1,75	11	3	704	192
	2	12	4	768	256
	2,25	13	5	832	320
	2,5	14	6	896	384
	2,75	15	7	960	448
	3	16	8	1024	512
	3,25	17	9	1088	576
	3,5	18	10	1152	640
	3,75	19	11	1216	704
	4	20	12	1280	768
	4,25	21	13	1344	832
	4,5	22	14	1408	896
	4,75	23	15	1472	960
5	24	16	1536	1024	

При 50-відсотковій неідентичності коефіцієнтів підсилення відношення основного відгуку і КСС дорівнює 5 (рис. 5).

Слід вказати, що чисельні значення графіків АЧХ, зображених на рис. 3 – 5 і в подальшому, для більш наочного співставлення рівнів основного відгуку і КСС попередньо були віднормовані на 2, чим пояснюється невідповідність параметрів шкали вертикальної вісі даним табл. 1 (відрізняються у 2 рази).

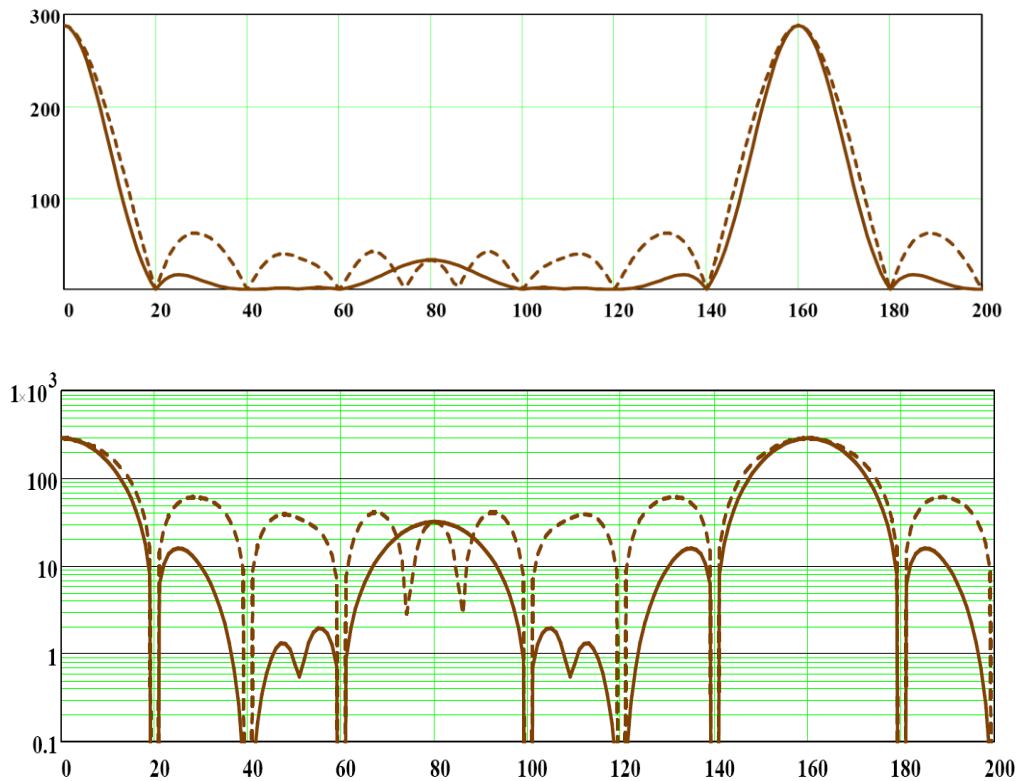


Рис. 4. АЧХ ФДС за умови $K = 1,25$

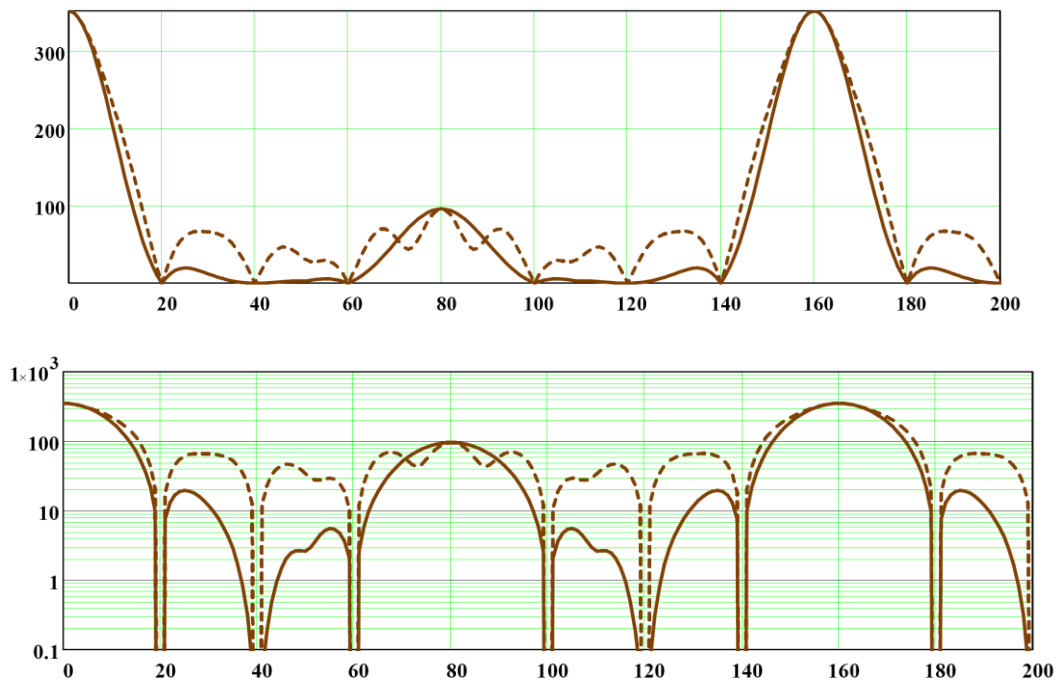


Рис. 5. АЧХ ФДС при $K = 1,5$

В свою чергу, відношення рівнів основної та комплексно-сполученої складових сигнального відгуку по виходу ФДС визначається формулою

$$C = (8 + t)^{-1} \quad (5)$$

Наприклад, для $K = 101$ має місце $t = 100/0,25 = 400$. Звідси, відношення рівнів основного відгуку і КСС визначиться у вигляді $\frac{8+t}{t} = \frac{408}{400} = \frac{51}{50}$ (див. рис. 6).

Підставивши значення t у вираз $(8+t)^{-1}$, виразимо відносний рівень КСС через величину розбалансу коефіцієнта підсилення K :

$$C_K = \frac{8 \cdot 0,25 + K - 1}{K - 1} = \frac{2 + K - 1}{K - 1} = \frac{K + 1}{K - 1}. \quad (6)$$

Вираз (6) дозволяє розрахувати відносний рівень КСС для довільних значень величини квадратурного розбалансу K . Наприклад, для $K=2,2$ нескладно отримати відношення рівнів основної та комплексно-сполученої складових сигнального відгуку $\frac{K+1}{K-1} = \frac{3,2}{1,2} = \frac{0,8}{0,3} = \frac{8}{3}$, що відповідає результатам математичного моделювання.

В загальному випадку для довільної протяжності строби N відношення основного відгуку і КСС визначиться формулою

$$C = \frac{0,25N + K - 1}{K - 1}. \quad (7)$$

Наприклад, для $N = 16$ отримаємо $\frac{0,25N + K - 1}{K - 1} = \frac{4 + K - 1}{K - 1} = \frac{K + 3}{K - 1}$. При $K = 2,2$ відносний рівень КСС становитиме $\frac{K + 3}{K - 1} = \frac{2,2 + 3}{2,2 - 1} = \frac{5,2}{1,2} = \frac{13}{3}$.

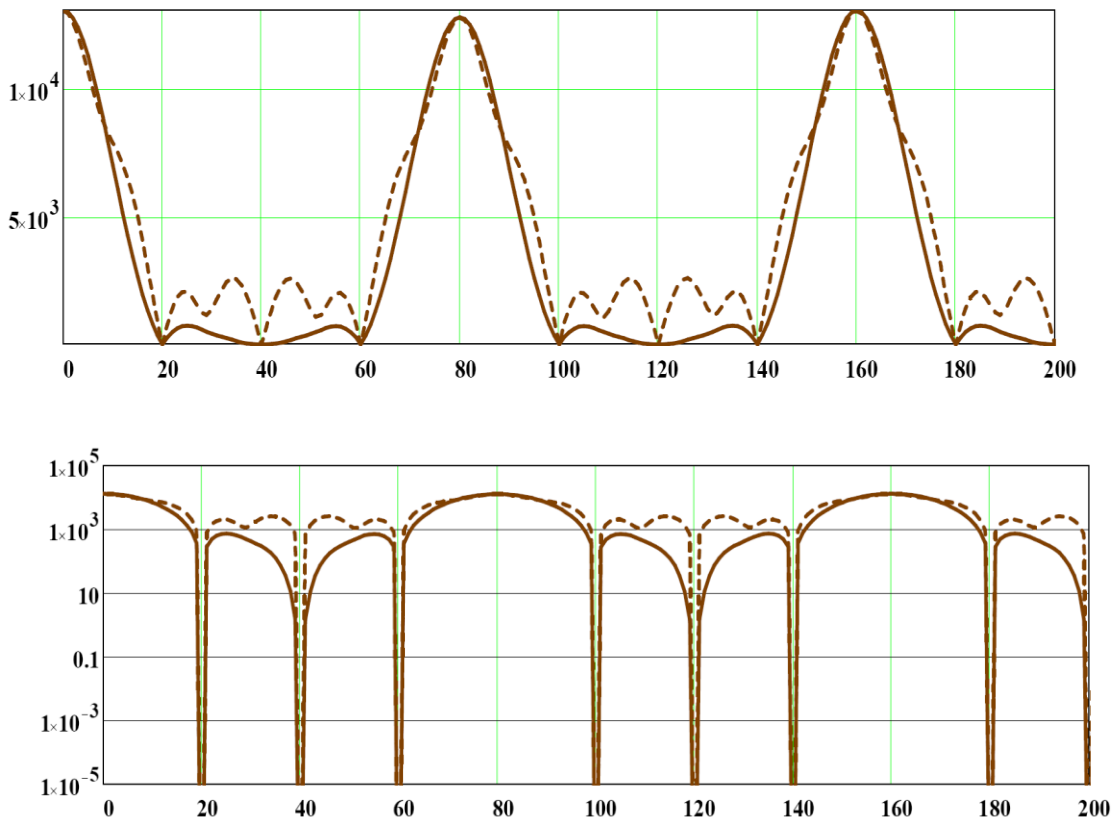


Рис. 6. АЧХ ФДС при $K = 101$

Співвідношення (7) лишається в силі при довільній розмірності I/Q -демодулятора, що було доведено результатами моделювання для з використанням попередньої I/Q -демодуляції 16-го та 22-го порядків. При цьому використовувалась методика розрахунку вагових коефіцієнтів I/Q -демодулятора, викладена у [4].

Спираючись на формулу (7), нескладно отримати вираз для вирішення зворотного завдання – розрахунку фактичного розбалансу коефіцієнтів підсилення півканалів за результатами виміру відношення основного відгуку і КСС:

$$K = \frac{0,25N + C - 1}{C - 1} \quad (8)$$

Таким чином, якщо порівняти результат обчислення величини C у (7) при $K = 2,2$ для $N = 8$ і $N = 16$, то неважко зробити висновок, що зі збільшенням тривалості стробу відносний рівень КСС при тому ж самому значенні квадратурної неідентичності коефіцієнта підсилення знижується.

Висновки. Отже, вперше отриманий новий аналітичний розрахунок рівня комплексно – сполученого відгуку сигналу після додаткового стробування відліків аналого – цифрового перетворювача. Співвідношення (7) лишається в силі при довільній розмірності I/Q -демодулятора. Особливість виразу (8) полягає у тому, що чим довше строб, тим більшою за величиною може бути неідентичність амплітуд квадратурних сигналів, якою слід обмежити технологічний розкид параметрів півканалів.

В ході подальших досліджень розробки методу аналітичного розрахунку рівня комплексно-сполучених компонент сигнальних відгуків по виходу фільтру додаткового стробування (ФДС) відліків аналого - цифрового перетворювача, необхідно врахувати той факт, що дає підстави у разі необхідності спростити вимоги до ідентичності квадратурних півканалів при реалізації розглянутих варіантів ФДС, що дозволить підвищити завадозахищеність каналів зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент України на корисну модель № 66358. МПК G01S 7/36 (2006.01), H03D 13/00 (2006.01). Спосіб додаткового стробування цифрових відліків сигналів. /Слюсар В.І., Копієвська В.С., Живило Є.О. – Заявка на видачу патенту України на корисну модель № u201110520 від 30.08.2011. – Патент опубліковано 26.12.2011, бюл. № 24.
2. Копієвська В.С. Метод розрахунку рівня комплексно-сполучених сигнальних відгуків по виходу пристрою додаткового стробування відліків аналогового - цифрового перетворювача /Копієвська В.С. // VI-й Науково-практичний семінар „Приоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” – м.Київ. – ВІПІ НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 125.
3. Jan-Erik Eklund and Ragnar Arvidsson. A Multiple Sampling, Single A/D Conversion Technique for Demodulation in CMOS// IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, No. 12, December 1996. – pp.1987 – 1994.– http://iroi.seu.edu.cn/jssc9697/data/31_12_08.PDF.
4. Слюсар В.И. Синтез алгоритмов измерения дальности М источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП / Слюсар В.И. // Радиоэлектроника. – 1996. - № 5. – С. 55 – 62. (Изв. вузов). – http://www.slyusar.kiev.ua/IZV_VUZ_1996_5.PDF.
5. Слюсар В.И., Методика синтеза I/Q-демодуляторов произвольной размерности /Слюсар В.И., Малярчук М.В., Бондаренко М.В.// III-й Міжнародний науково-технічний симпозиум „Нові технології в телекомунікаціях” – (ДУІКТ – КАРПАТИ '2010, с. Вишків). – Київ: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. – 2 – 5 лютого 2010.– С. 53 – 55.