

Лабораторна робота 2.5

ВИВЧЕННЯ ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ПЕРЕДАВАННЯ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

1 Мета заняття

1.1 Вивчення методу цифрового передавання аналогових сигналів ІКМ та ДІКМ.

1.2 Дослідження основних характеристик методу передавання ІКМ та ДІКМ.

2 Ключові положення

2.1 Цифрові методи передавання. У сучасних телекомунікаціях широко використовуються методи цифрового передавання аналогових сигналів: аналоговий сигнал перетворюється в цифровий, тобто в послідовність двійкових символів, цифровий сигнал передається цифровим каналом зв'язку, після чого відновлюється аналоговий сигнал. Будь-який метод цифрового передавання характеризується швидкістю цифрового сигналу R (біт/с) і точністю передавання – відношенням сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв}}$. Звичайно ставиться задача – задовольнити вимозі за відношенням $\rho_{\text{кв}}$ за мінімального значення R . Це призвело до розробки значної кількості цифрових методів передавання. Найпростішими серед них є: *імпульсно-кодова модуляція* (ІКМ), *диференціальна імпульсно-кодова модуляція* (ДІКМ) і *дельта-модуляція* (ДМ)¹. Перелічені назви поєднують собою цілі сімейства методів.

2.2 Дискретизація аналогових сигналів. За будь-якого методу цифрового передавання аналоговий сигнал $b(t)$, передусім, перетворюється в дискретний сигнал, що представляє собою послідовність відліків $b(kT_d)$, узятих через інтервал дискретизації $T_d \leq 1/(2F_{\text{max}})$, де F_{max} – максимальна частота спектра сигналу $b(t)$. Це перетворення називається *дискретизацією сигналу за часом*, а пристрій для її здійснення – *дискретизатором*. Частота дискретизації має бути не менше подвоєної частоти F_{max} :

$$f_d = 1/T_d \geq 2F_{\text{max}}. \quad (1)$$

Згідно з теоремою Котельникова, виконання цього співвідношення гарантує можливість точного відновлення аналогового сигналу за відліками. Таке відновлення здійснюється ФНЧ із частотою зрізу F_{max} (рис. 1).



Рисунок 1 – Передавання аналогового сигналу відліками

Усі методи цифрового передавання аналогових сигналів відрізняються способами представлення дискретних сигналів цифровими. Перетворювач відліків

¹ Незважаючи на наявність слова «модуляція», ці методи передавання не мають відношення ні до аналогової, ні до цифрової модуляції.

у цифровий сигнал називається кодером цифрової системи передавання (ЦСП), а перетворювач цифрового сигналу у відліки – декодером ЦСП.

2.3 Методи ІКМ. Особливістю цих методів є те, що кожний відлік представляється цифровим сигналом незалежно від інших відліків. Схема, що відображає передавання відліків при ІКМ, наведена на рис. 2.

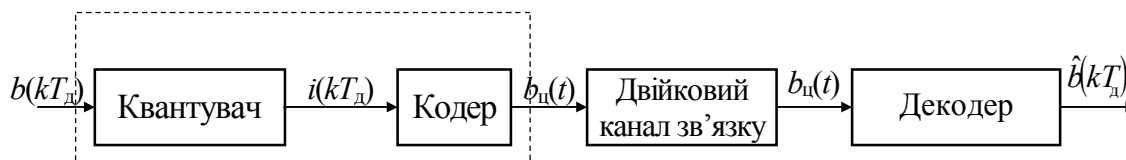
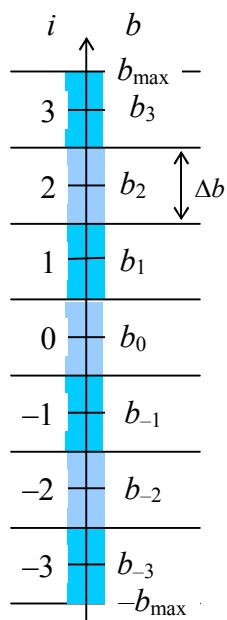


Рисунок 2 – Кодер та декодер ІКМ

Основний параметр квантувача – число рівнів квантування L . За рівномірного квантування діапазон значень b від $-b_{\max}$ до b_{\max} розбивається на $L - 1$ інтервалів величиною

$$\Delta b = 2b_{\max} / (L - 1), \quad (2)$$

яка називається кроком квантування. На рис. 3 показано розбиття при $L = 8$.



Дискретні значення b_i відповідають серединам інтервалів. Індекс i приймає значення $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 0,5L - 1$. Дискретні значення визначаються $b_i = i \cdot \Delta b$. При квантуванні кожен відлік $b(kT_d)$ округляється до найближчого дискретного значення b_i , а на вихід квантувача надходить ціле число $i(kT_d)$. Представлення відліку $b(kT_d)$ дискретним значенням b_i вносить похибку

$$\varepsilon_{\text{кв}}(kT_d) = i(kT_d) \cdot \Delta b - b(kT_d), \quad (3)$$

яка називається шумом квантування.

У кодері, що входить до складу кодера ІКМ (рис. 2), числа $i(kT_d)$ представляються заданим двійковим кодом. Довжина коду

$$n = \log_2 L, \quad (4)$$

Цифровий сигнал на виході кодера $b_{\text{ц}}(t)$ має швидкість

$$R = n \cdot f_{\text{д}}, \quad (5)$$

Декодер з цифрового сигналу $b_{\text{ц}}(t)$ формує числа $i(kT_d)$, за якими відновлюються квантовані відліки: $i(kT_d) \Delta b = b_{\text{кв}}(kT_d) = \hat{b}(kT_d)$. З формули (3) випливає, що відліки відновлюються з похибками $\varepsilon_{\text{кв}}(kT_d)$. Середній квадрат похибки квантування (середня потужність шуму квантування) визначається кроком квантування

$$\overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2} = \frac{(\Delta b)^2}{12},$$

а відношення сигнал/шум квантування

$$\rho_{\text{кв}} = \frac{P_b}{\varepsilon_{\text{кв}}^2} = \frac{3(L-1)^2}{K_A^2}, \text{рази} \quad (6)$$

де K_A – коефіцієнт амплітуди аналогового сигналу.

$$\rho_{\text{кв}} = 10 \cdot \lg(\rho_{\text{кв.рази}}), \text{дБ}$$

$$P_b = \rho_{\text{кв.рази}} \cdot \overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}$$

Широко використовуються методи ІКМ з нерівномірним квантуванням: в області великих значень $|b|$ кроки квантування більші і навпаки. Це еквівалентне нелінійному перетворенню відліків з наступним рівномірним квантуванням. За рахунок такого перетворення зменшується K_A і зростає $\rho_{\text{кв}}$ за незмінного числа L – формула (6), або, зберігаючи значення $\rho_{\text{кв}}$, можна зменшити число L , довжину коду n і швидкість цифрового сигналу R – формули (4) і (5).

2.4 Методи ДІКМ. Вони відносяться до методів передавання із завбаченням. При цифрових методах передавання частота дискретизації (1) вибирається з умови відсутності накладення складових спектра дискретного сигналу. При цьому відліки реальних аналогових сигналів є корельованими. Це дозволяє з тією чи іншою точністю передбачувати значення чергового відліку сигналу за його попередніми відліками. Ця можливість покладена в основу схем кодера і декодера ДІКМ, що наведені на рис. 4. Передбачувачі у кодері і декодері цілком ідентичні. Вони обчислюють похибку передбачення

$$d(kT_d) = b(kT_d) - \tilde{b}(kT_d), \quad (7)$$

де $\tilde{b}(kT_d)$ – передбачений відлік, сформований передбачувачем на основі N попередніх відліків $\hat{b}((k-1)T_d)$, $\hat{b}((k-2)T_d)$, $\dots \hat{b}((k-N)T_d)$. У різних варіантах використання методу ДІКМ число N знаходиться в межах від 1 до 6. Передбачувач при $N \geq 2$ виконується за схемою нерекурсивного фільтра. У випадку $N = 1$ передбаченим відліком $\tilde{b}(kT_d)$ є попередній відлік $\hat{b}((k-1)T_d)$.

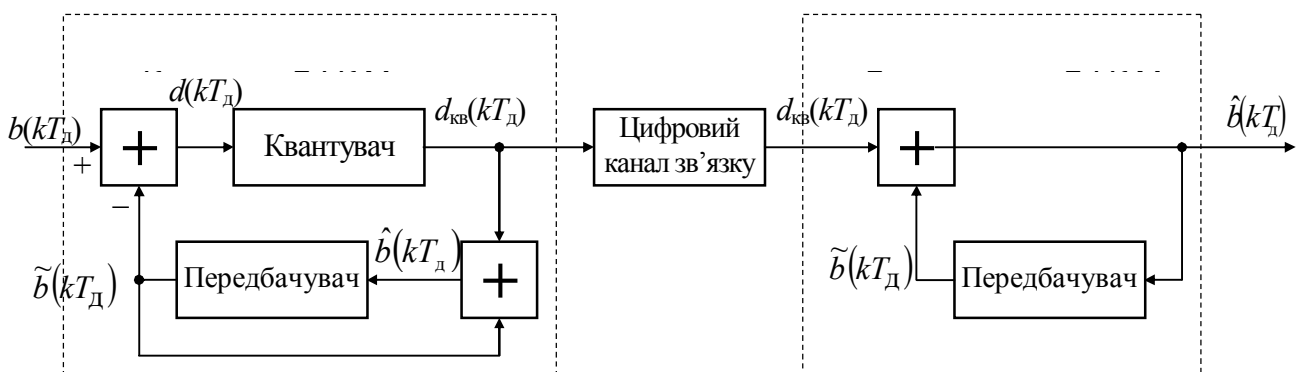


Рисунок 4 – Кодер і декодер ДІКМ

У кодері похибка передбачення надходить на квантувач, аналогічний квантувачу ІКМ, а потім квантована похибка $d_{\text{кв}}(kT_d)$ передається цифровим сигналом каналом зв'язку (на рис. 4 не показані кодер для представлення $d_{\text{кв}}(kT_d)$ двійковим кодом і декодер для відновлення $d_{\text{кв}}(kT_d)$ – вони включені до складу каналу зв'язку).

Похибка квантування при ДІКМ

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{кв}}(kT_d) &= \hat{b}(kT_d) - b(kT_d) = [\tilde{b}(kT_d) + d_{\text{кв}}(kT_d)] - [\tilde{b}(kT_d) + d(kT_d)] = \\ &= d_{\text{кв}}(kT_d) - d(kT_d),\end{aligned}\quad (8)$$

визначається тільки параметрами квантувача.

Розмах дискретного сигналу $d(kT_d)$ менший, ніж розмах сигналу $b(kT_d)$, тому число рівнів квантування L при незмінному кроці квантування буде меншим, ніж при ІКМ, а, отже, менше довжина коду n і швидкість цифрового сигналу R .

3. Ключові питання

3.1 Пояснити принцип формування цифрового сигналу у системі передавання методом ІКМ.

3.2 Як визначається інтервал дискретизації або частота дискретизації?

3.3 Що таке крок квантування та як він вибирається?

3.4 Від чого залежить довжина коду при ІКМ?

3.5 Пояснити, що таке шум квантування? Яка причина його виникнення?

3.6 Як підвищити відношення сигнал/шум квантування у системах передавання методом ІКМ?

3.7 Пояснити принцип формування цифрового сигналу у системі передавання методом ДІКМ.

4. Домашнє завдання

4.1 Вивчити розділ “Цифрові методи передачі неперервних повідомлень” за конспектом лекцій і літературою [1, с. 40...45; 2, с. 34...55; 3, с. 453...467; 4, с. 335...347] й опис лабораторного макета в розд. 6.

4.2 Зобразити структурні схеми кодерів і декодерів ІКМ і ДІКМ.

4.3 Виконати кодування аналогового сигналу методом ІКМ з рівномірним квантуванням. Задані: частота дискретизації 8 кГц; числа рівнів квантування $L_1 = 2^{N+2}$ (де N – номер варіанту з 1-го по 6-ий далі варіанти циклічно повторюються $1 \equiv 7$, $2 \equiv 8$ і т.д.), $L_2 = 2 \cdot L_1$ і $L_3 = 2 \cdot L_2$. Розрахувати для трьох значень числа рівнів квантування: крок квантування Δb ($|b(t)|_{\text{max}} = 1$); довжину коду n ; середню потужність шуму квантування $\overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}$ (коефіцієнт амплітуди аналогового сигналу $K_A = 2,85$); відношення сигнал/шум квантування $\rho_{\text{кв}}$, подане у децибелах; швидкість цифрового сигналу R . Результати розрахунків оформити на зразок табл. 1. Проаналізувати, як змінюються $\rho_{\text{кв}}$ і R при зміні довжини коду на одиницю.

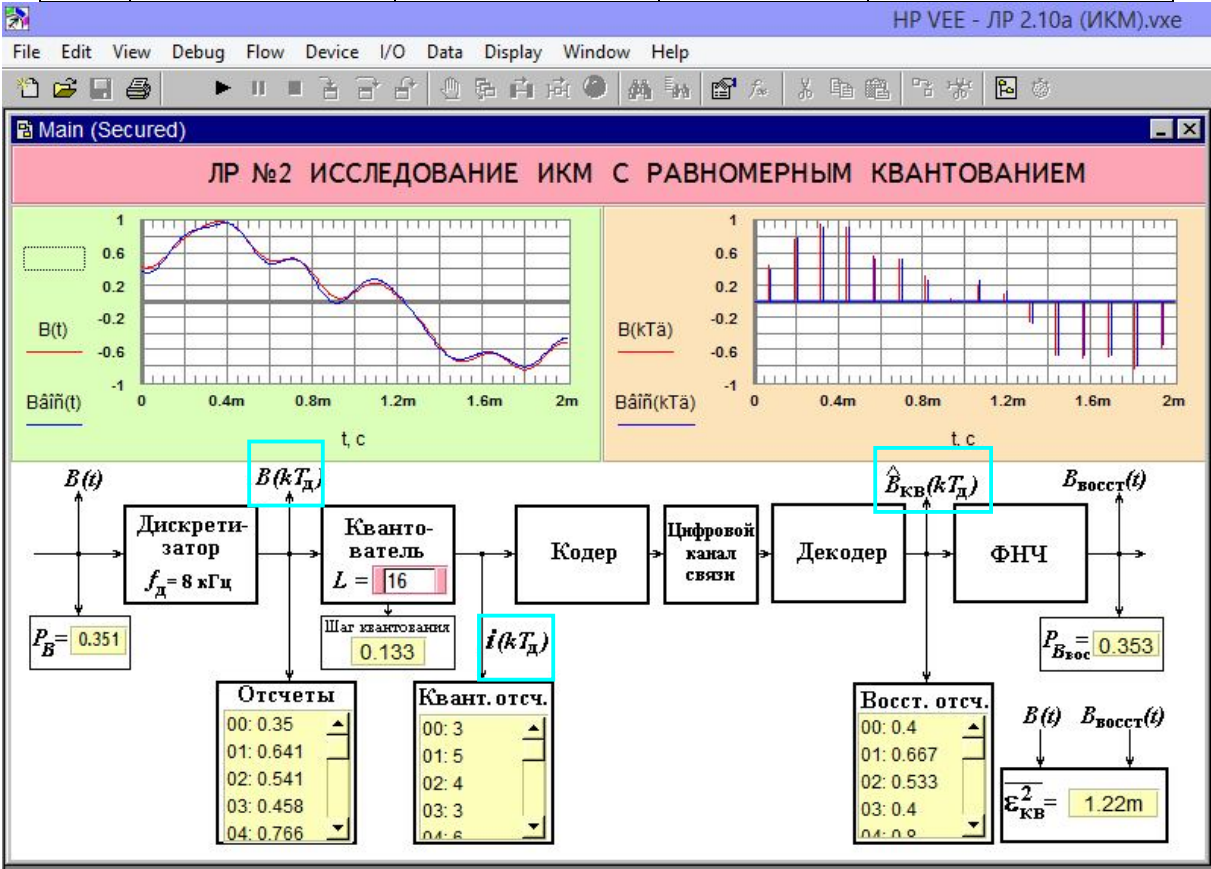
Таблиця 1 – Характеристики методів передавання ІКМ

Метод передавання	$f_{\text{д}}, \text{кГц}$	L	n	$R_s, \text{кбіт/с}$	P_b	Δb	$\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}$	$\rho_{\text{КВ}}, \text{рази}$	$\rho_{\text{КВ}}, \text{дБ}$	Примітки
ІКМ	8	L_1	n_1	R_1						(домашнє завдання)
		L_2	n_2	R_2						
		L_3	n_3	R_3						

5. Лабораторне завдання

5.2 Дослідження виникнення шуму квантування при ІКМ. Установити число рівнів квантування $L = 16$, записати значення Δb . Результати виконання програми оформити у вигляді таблиці $b(kT_{\text{д}})$, $i(kT_{\text{д}})$ та $b_{\text{КВ}}(kT_{\text{д}})$ для $k = 0, 1, 2$ і 3 . Визначити значення $\varepsilon_{\text{КВ}}(kT_{\text{д}})$, порівняти їх з Δb та пояснити результат.

k	$b(kT_{\text{д}})$	$i(kT_{\text{д}})$	$b_{\text{КВ}}(kT_{\text{д}})$	$\varepsilon_{\text{КВ}}(kT_{\text{д}})$
0				$b_{\text{КВ}}(kT_{\text{д}}) - b(kT_{\text{д}})$
1				
2				
3				



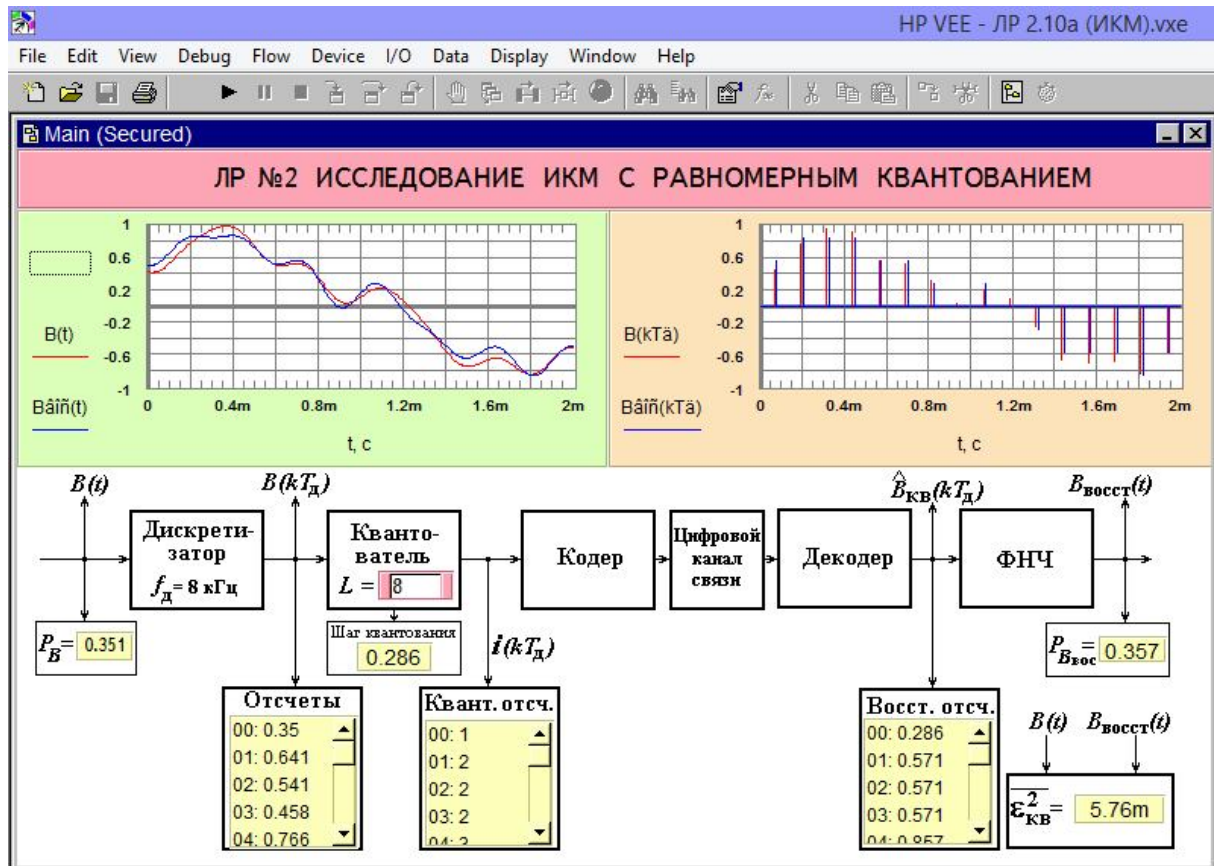
5.3 Дослідження відношення сигнал/шум квантування при ІКМ.

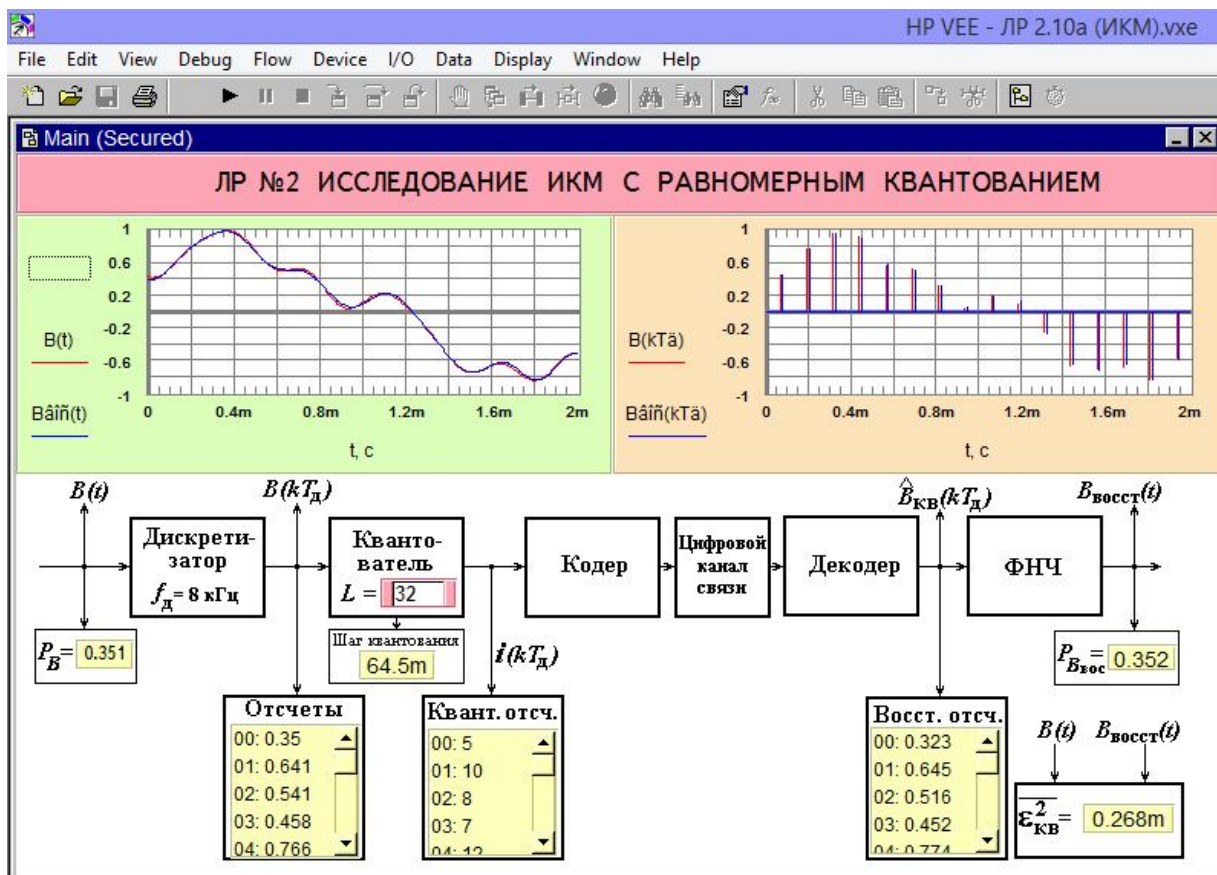
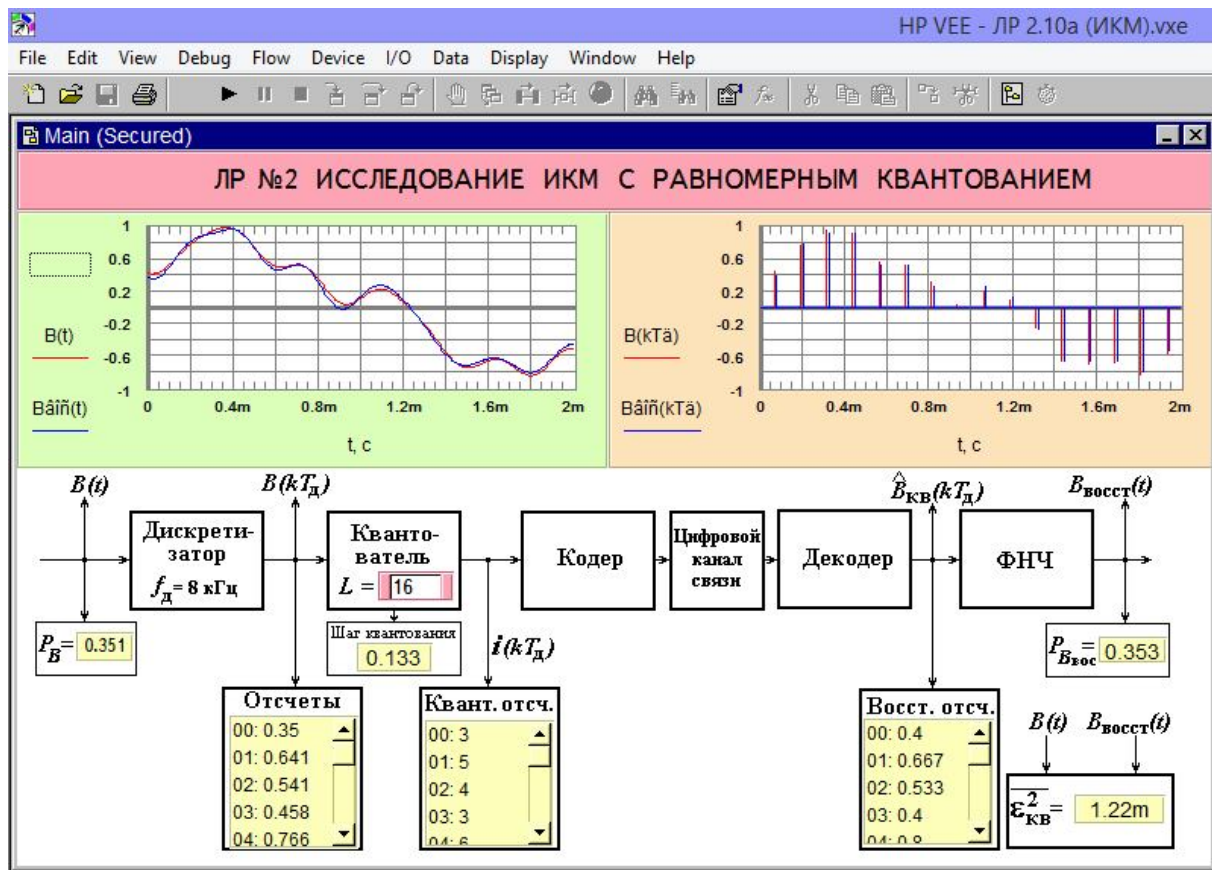
Установити число рівнів квантування L_1 з домашнього завдання. За результатами роботи програми занести до табл. 1 значення Δb , $\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}$ і P_b . Розрахувати експериментальне значення $\rho_{\text{КВ}}$. Порівняти отримані значення Δb , $\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}$ і $\rho_{\text{КВ}}$ з результатами їх розрахунків у домашньому завданні. Повторити завдання для L_2 і L_3 .

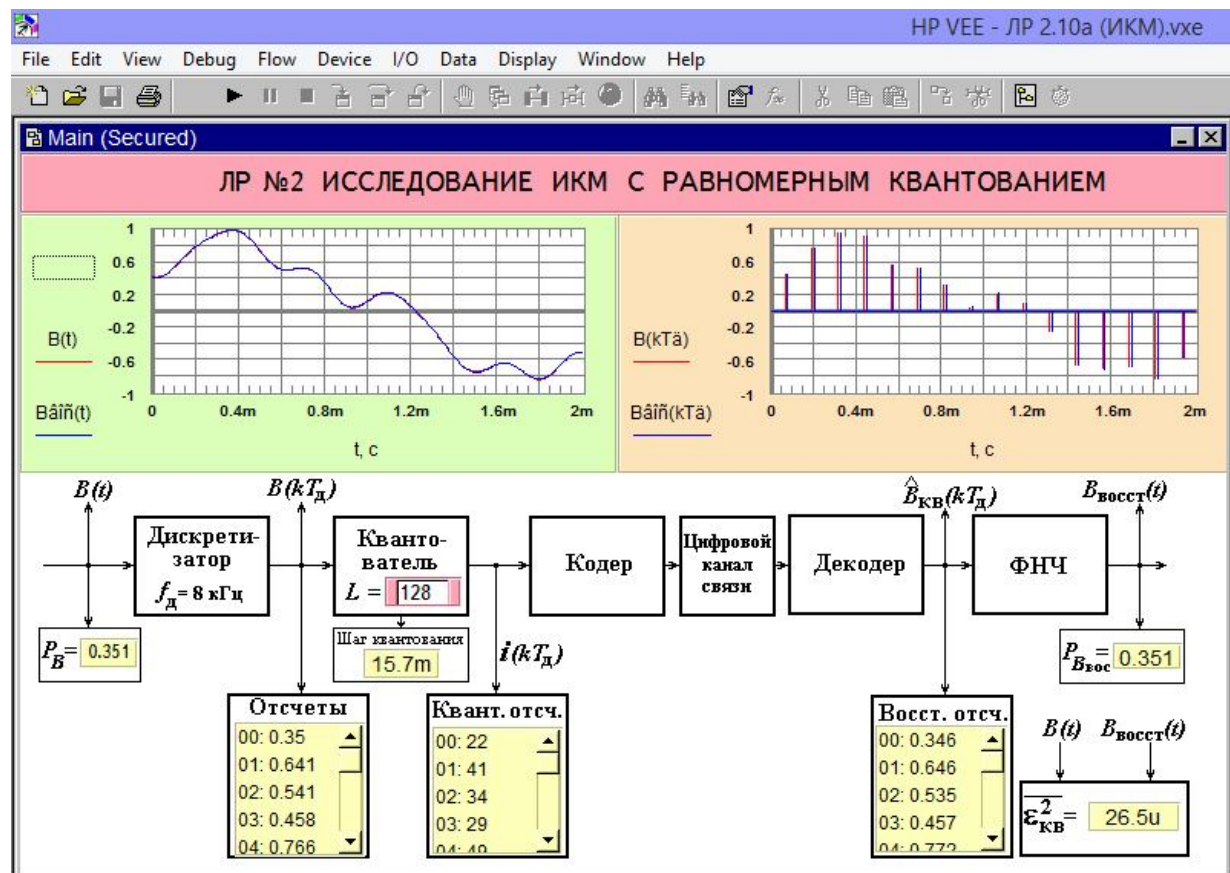
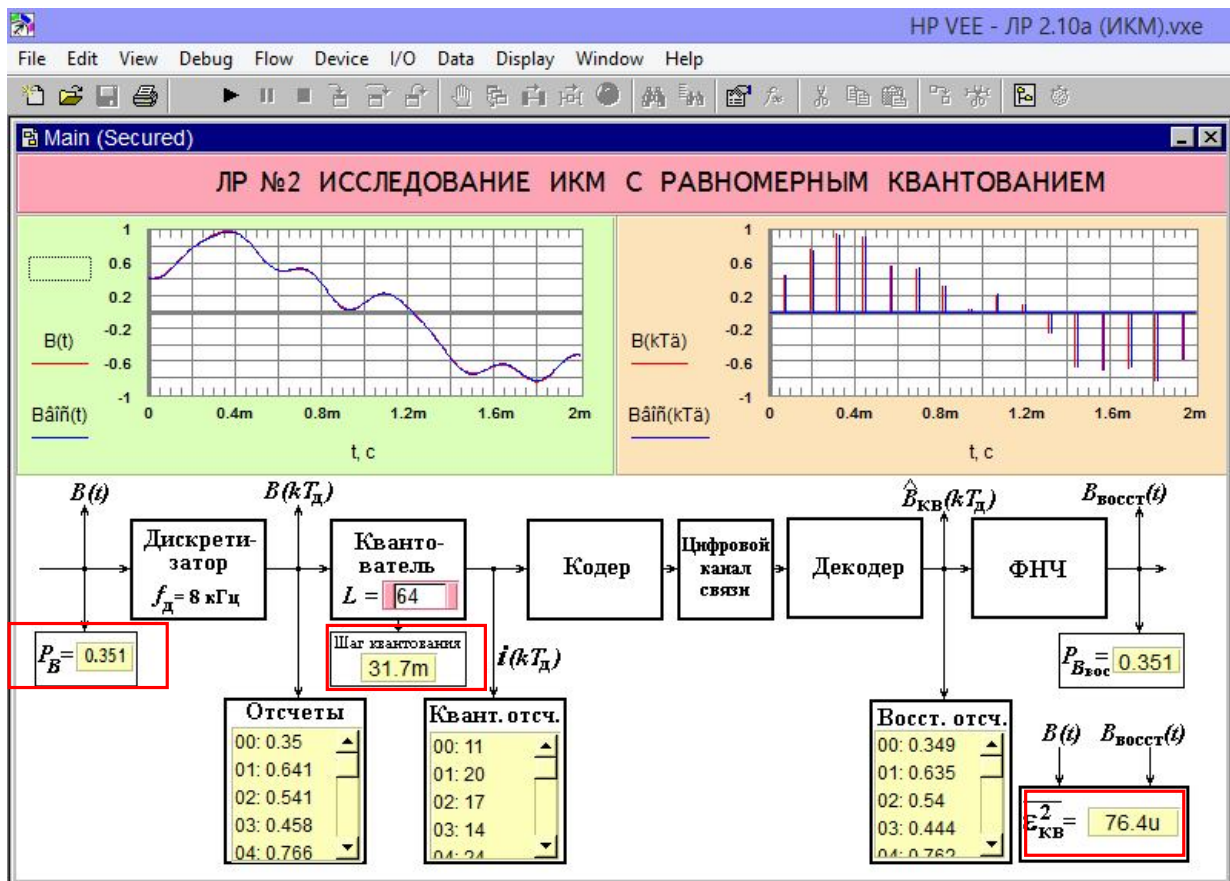
$$\rho_{\text{КВ}} = 10 \cdot \lg \frac{P_b}{\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}}, \text{ дБ}$$

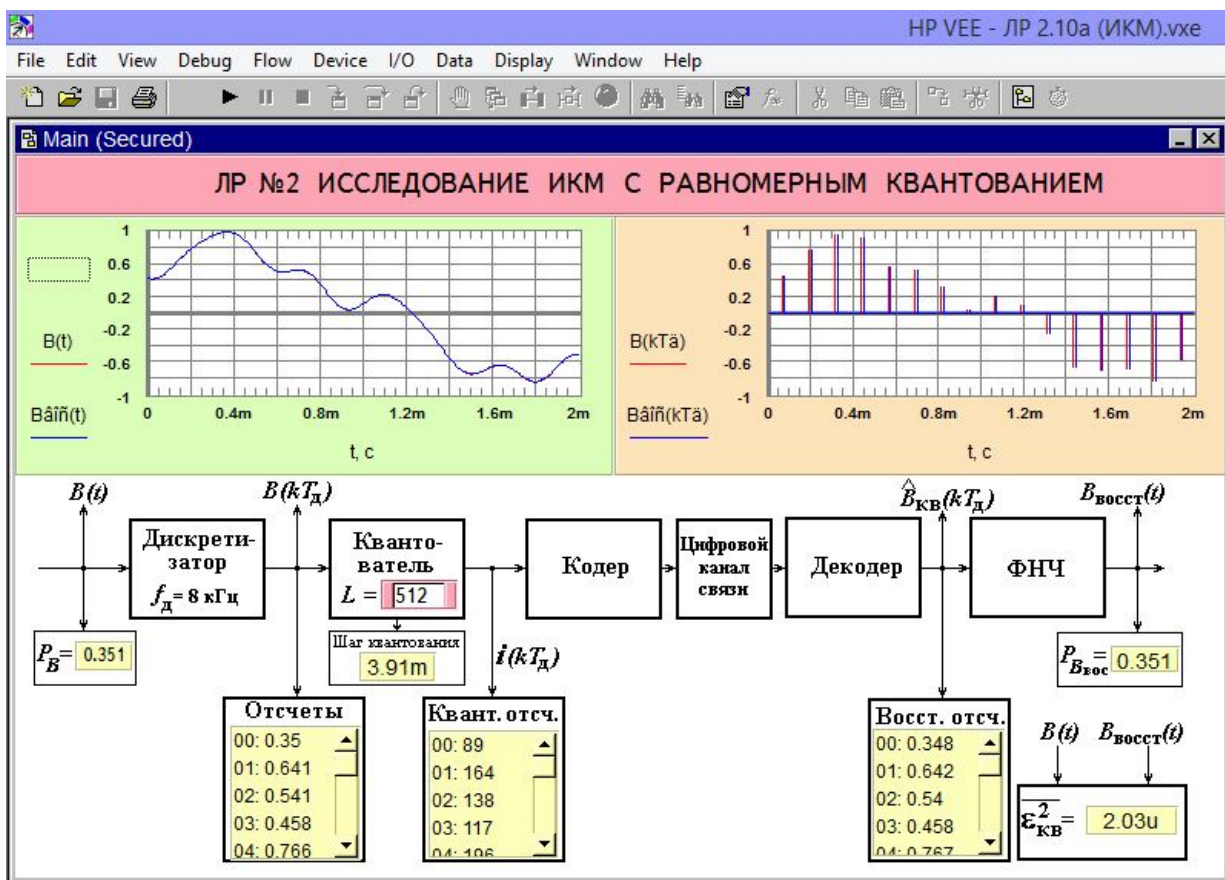
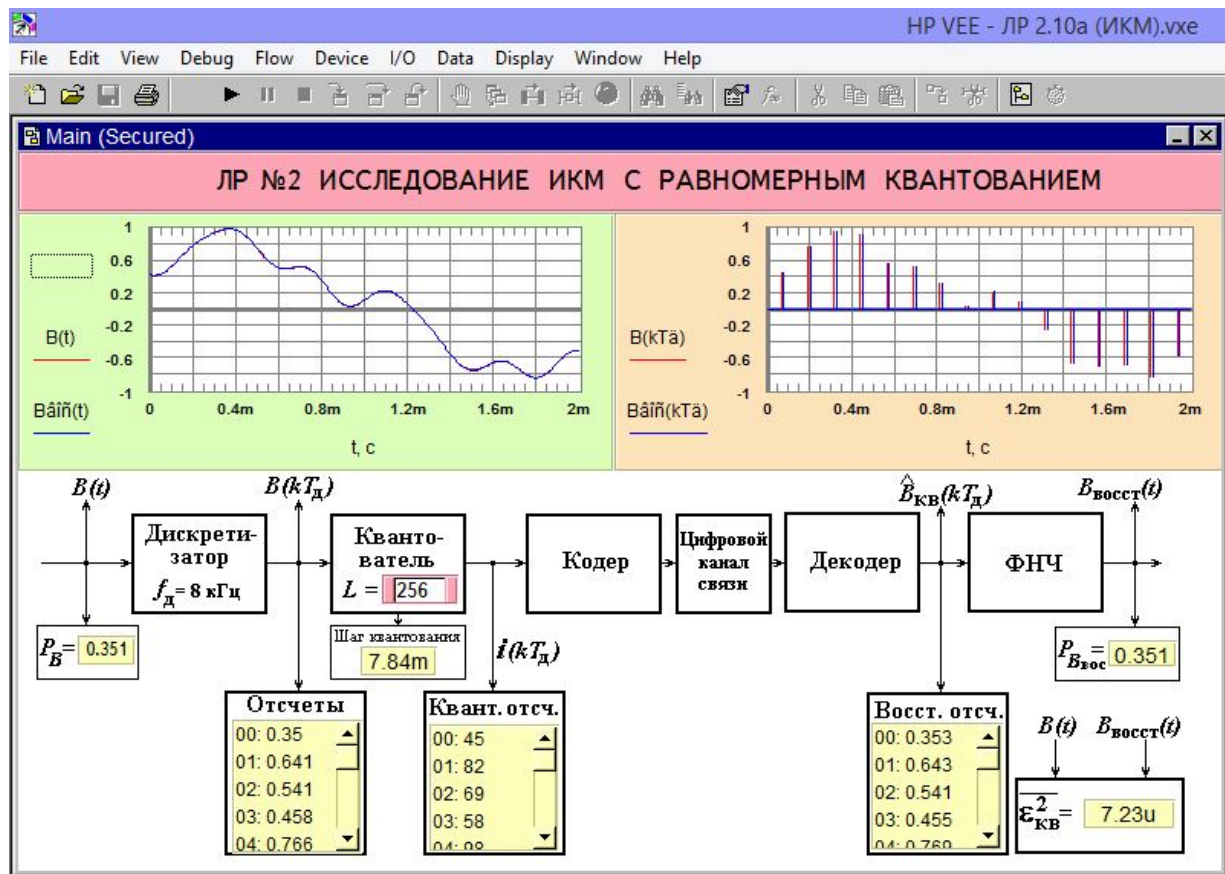
$$m=10^{-3}; u=10^{-6}$$

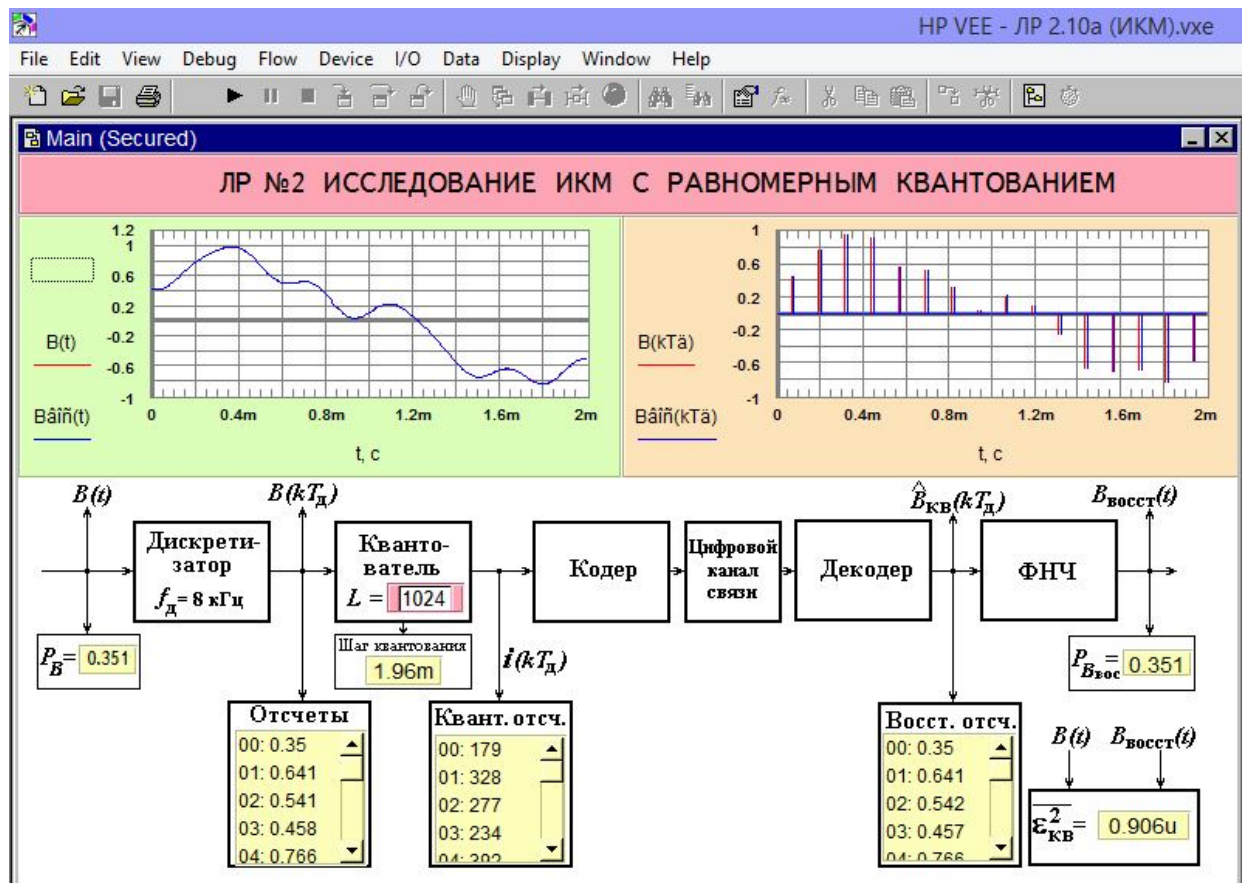
Метод передавання	$f_{\text{ДБ}}$, кГц	L	n	R , кбіт/с	P_b	Δb	$\overline{\varepsilon_{\text{КВ}}^2}$	$\rho_{\text{КВ}}$, дБ	Примітки
ІКМ	8	L_1	n_1	R_1					(лабораторне завдання)
		L_2	n_2	R_2					
		L_3	n_3	R_3					





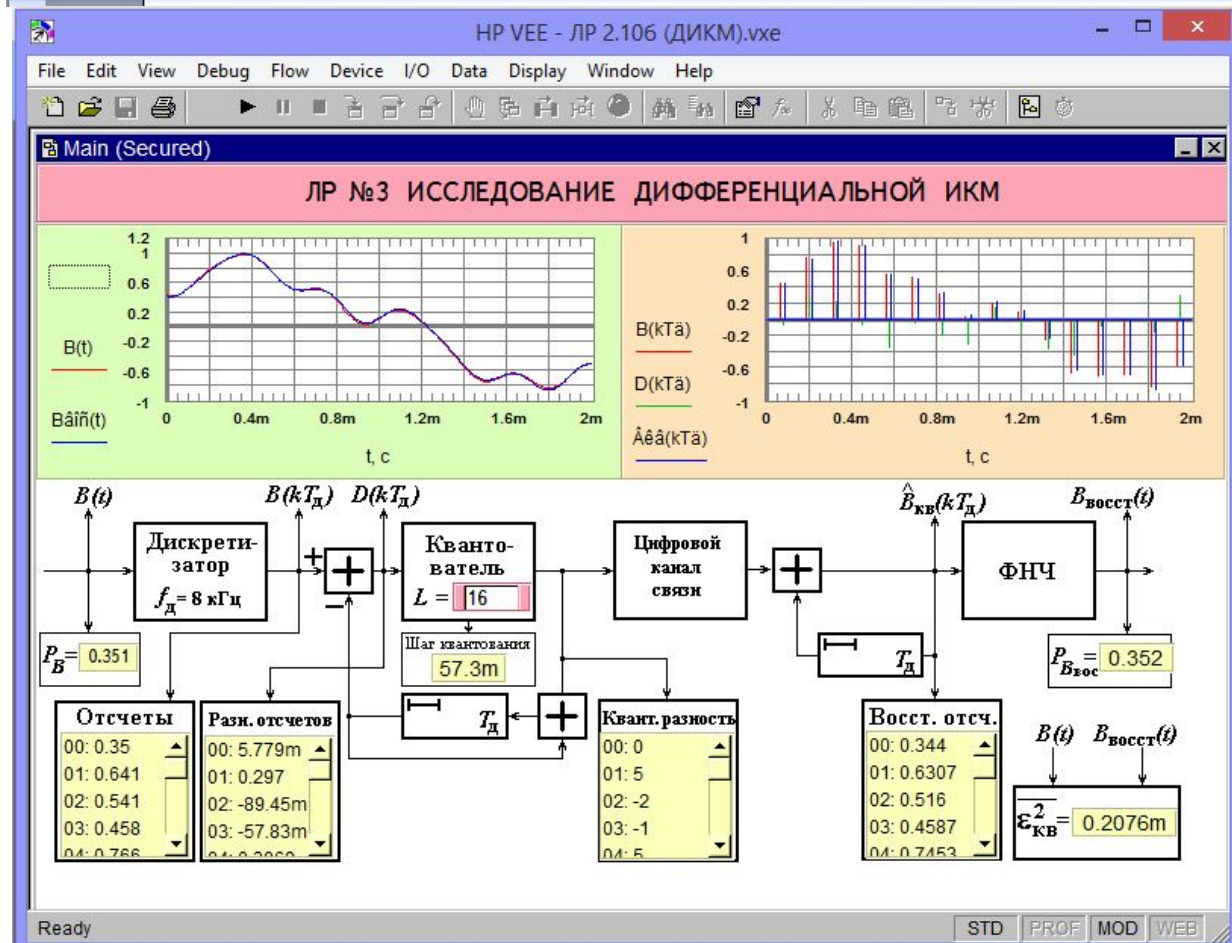
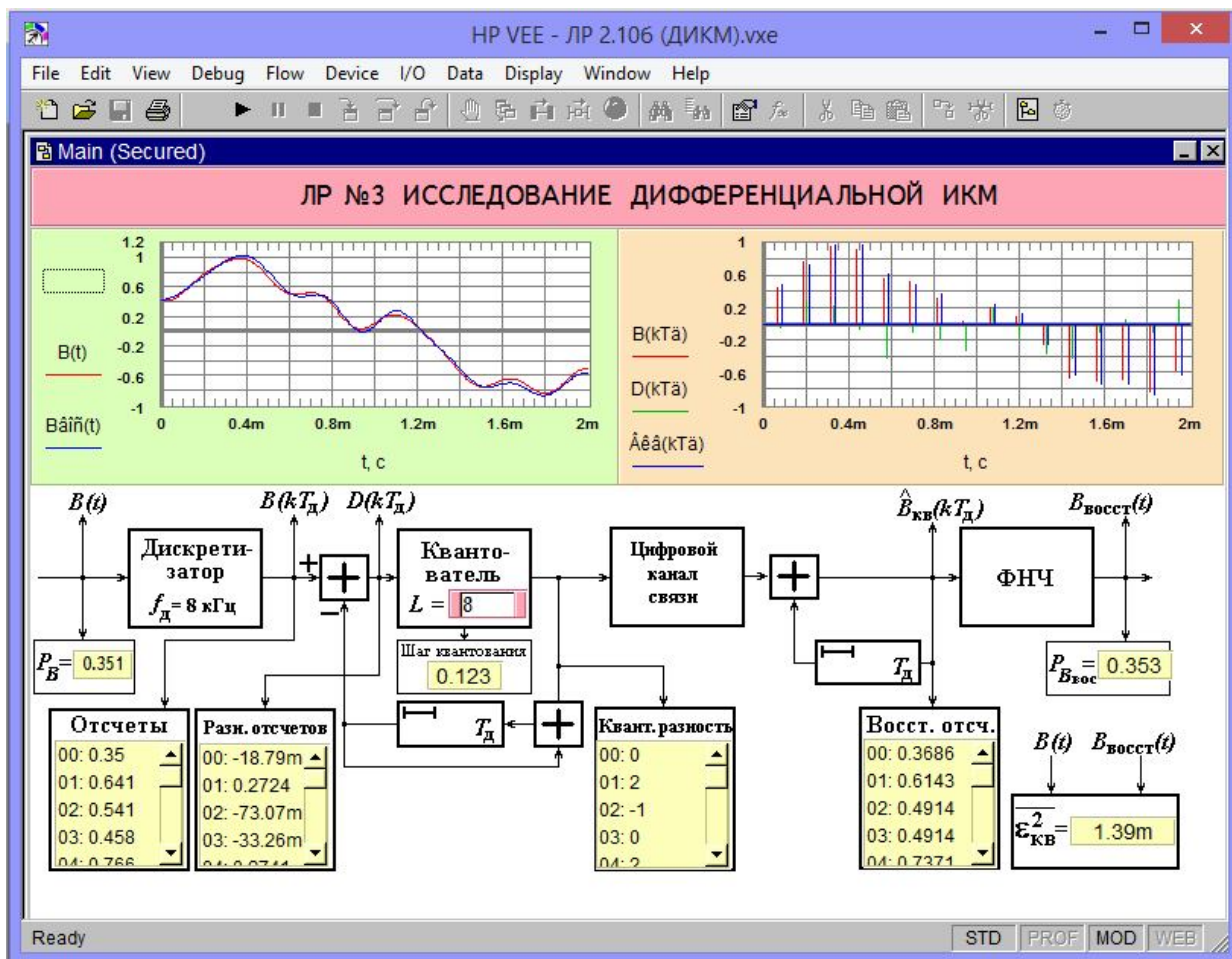


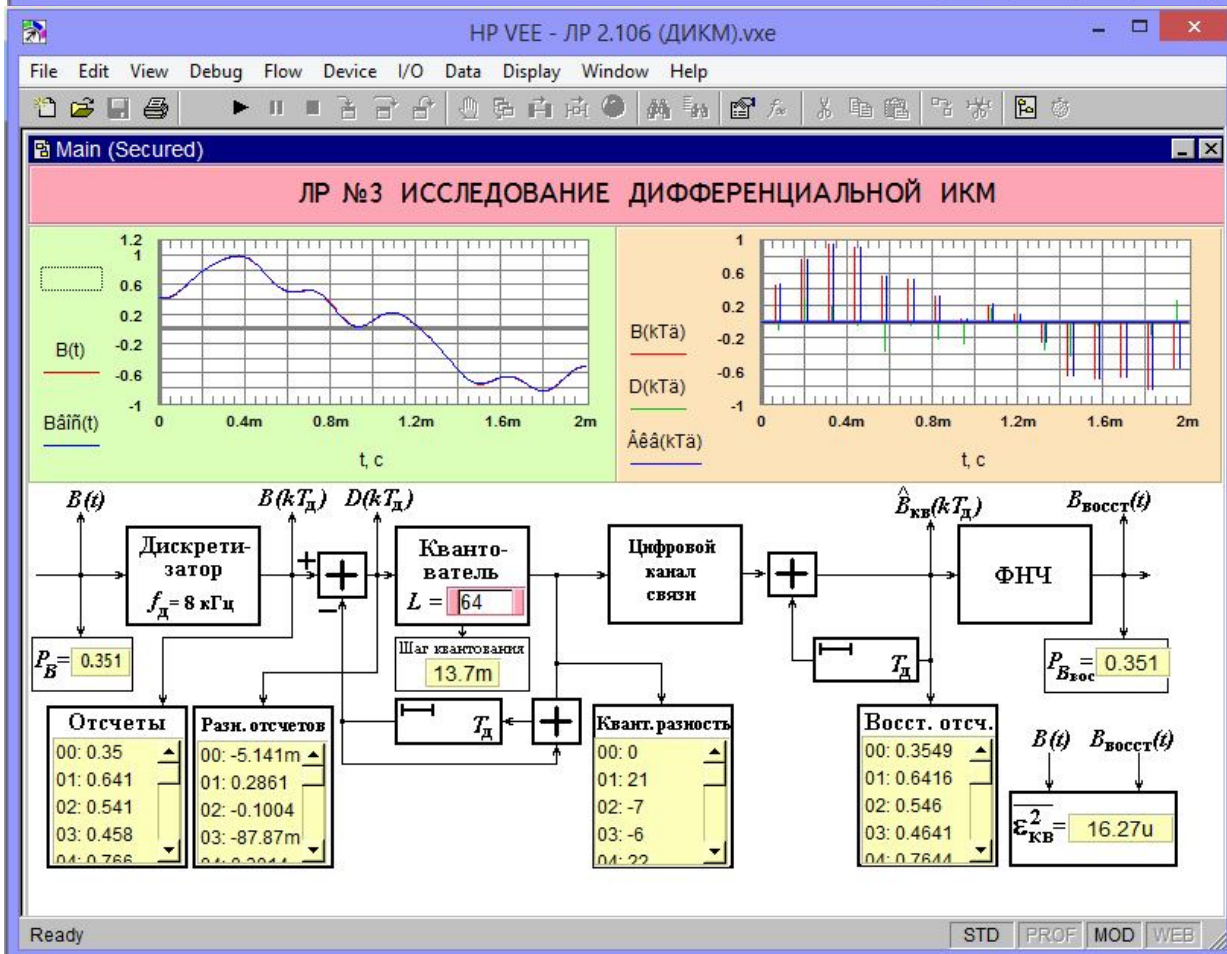
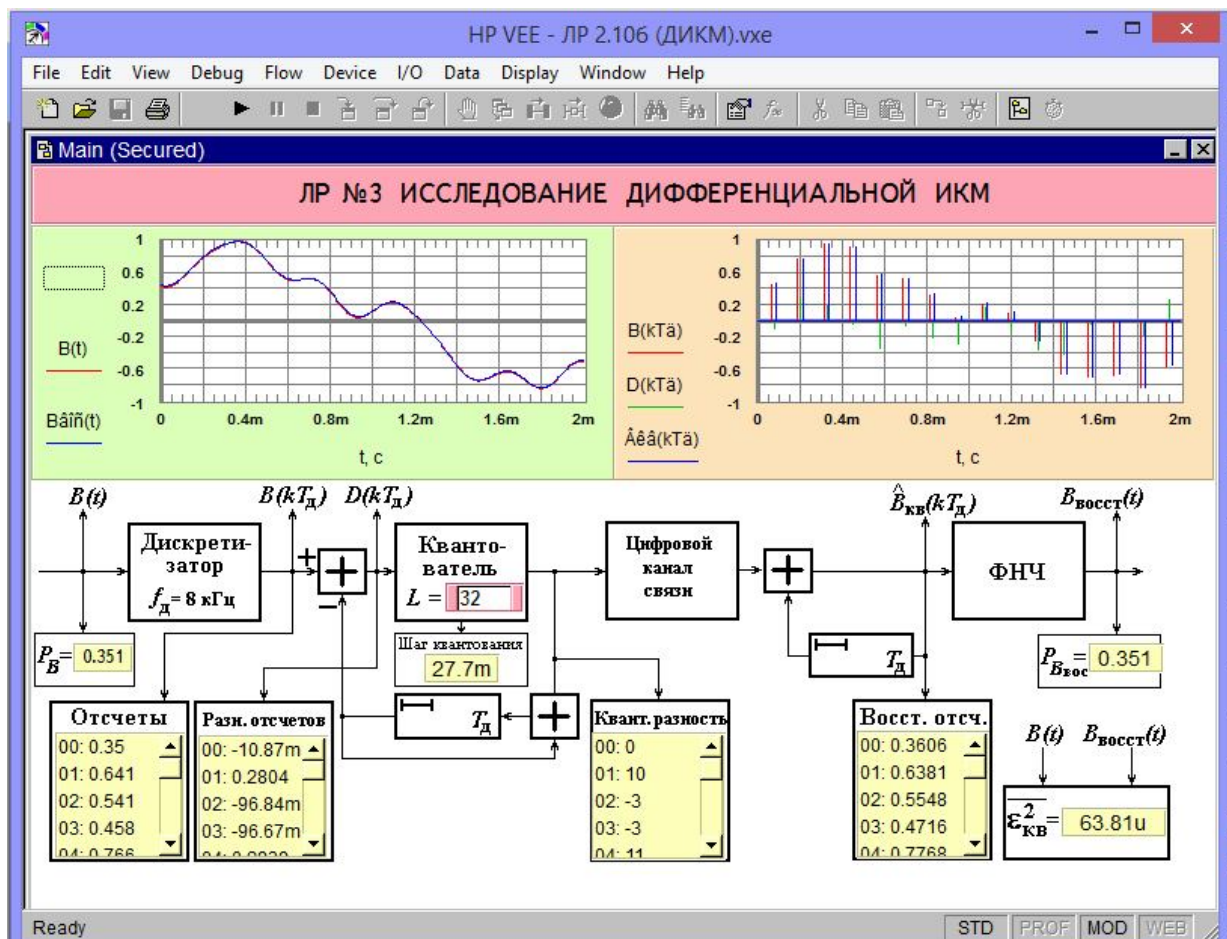


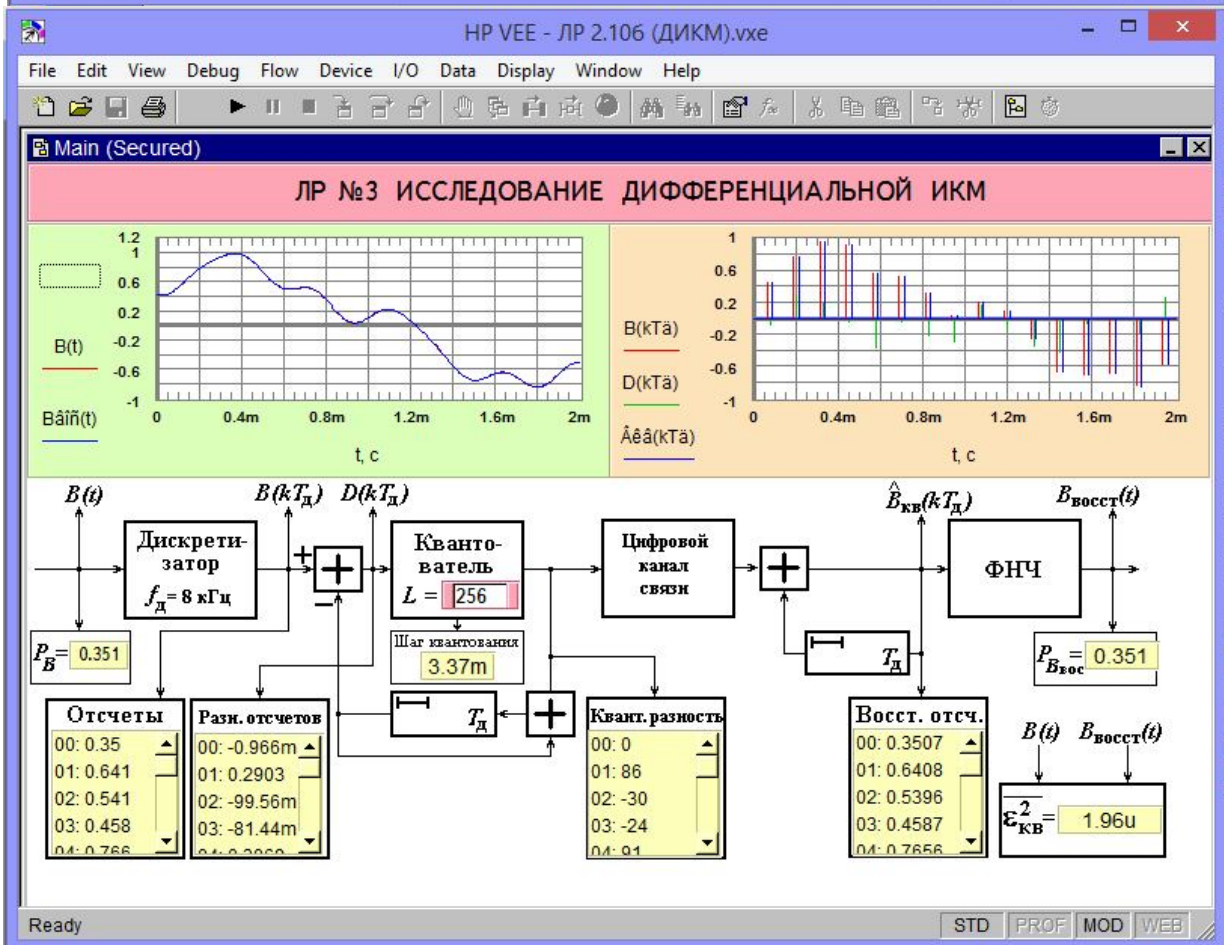
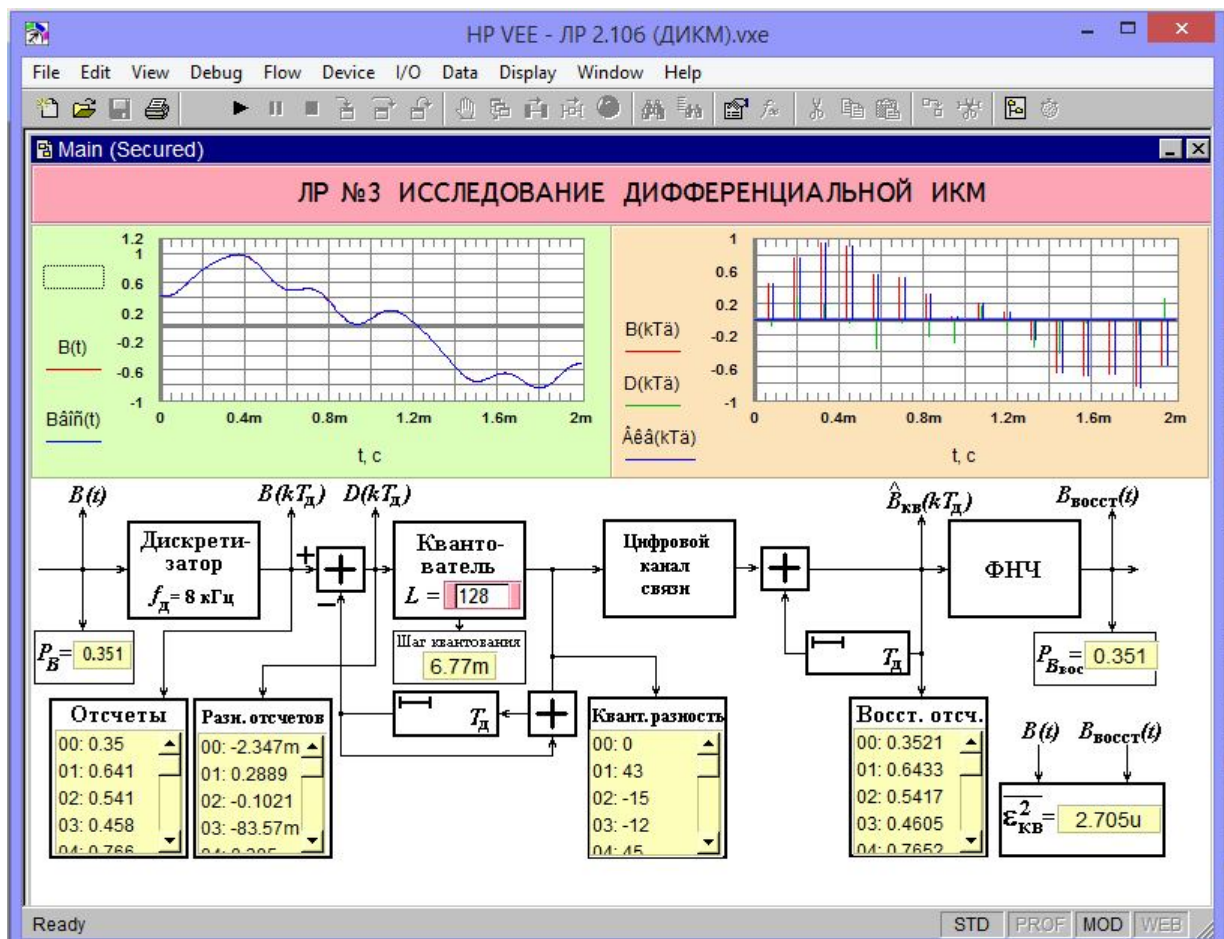


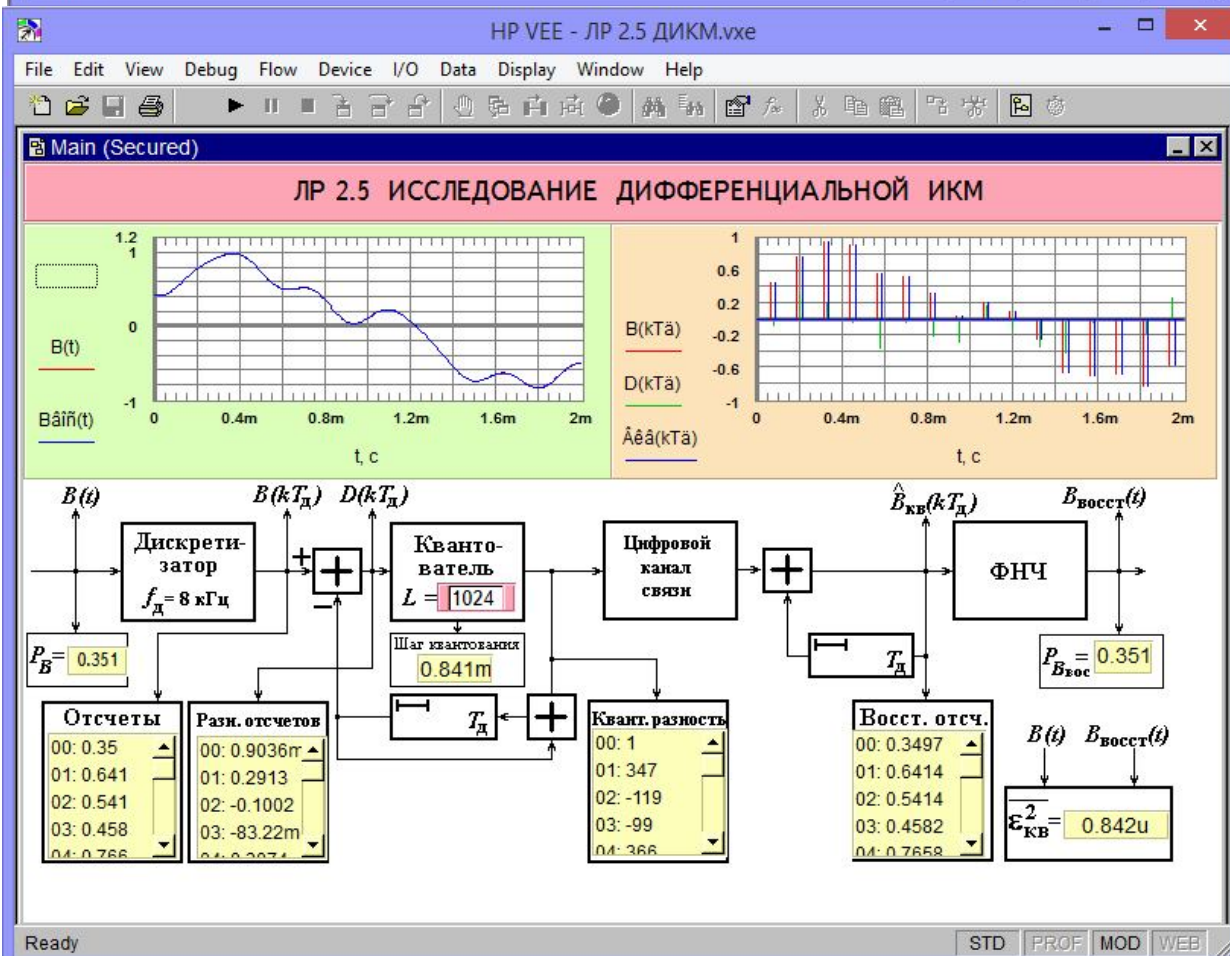
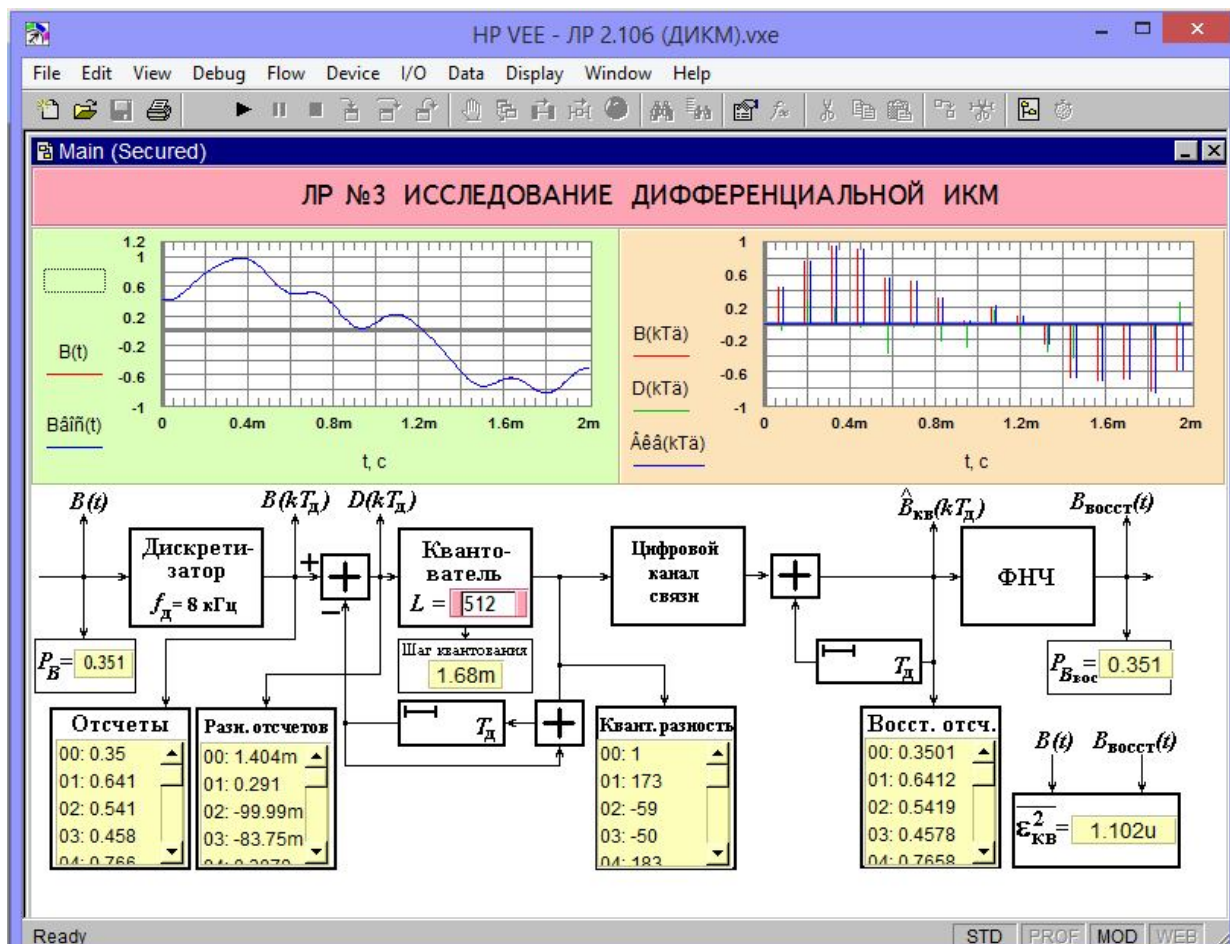
5.5 Дослідження кодера і декодера ДІКМ. Установити число рівнів квантування L_1 з домашнього завдання. За результатами роботи програми занести до табл. 1 значення Δb , $\overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}$ і P_b . Розрахувати експериментальне значення $\rho_{\text{кв}}$. Повторити завдання для L_2 і L_3 . Порівняти з результатами, отриманими при дослідженні методу передавання ІКМ.

Метод передавання	$f_{\text{дз}}$ кГц	L	n	R кбіт/с	P_b	Δb	$\overline{\varepsilon_{\text{кв}}^2}$	$\rho_{\text{кв}}$, дБ	Примітки
ДІКМ		L_1	n_1	R_1					
		L_2	n_2	R_2					
		L_3	n_3	R_3					









6 Опис лабораторного макета

Лабораторна робота виконується на комп'ютері з використанням трьох віртуальних макетів, структурні схеми яких наведені на рис. 7...9. За основу схем макетів покладені схеми, наведені на рис. 1, 2, 4 та 5.

Генератор аналогового сигналу формує сигнал як суму кількох гармонічних коливань. Тривалість сигналу 2 мс, а максимальна частота його спектра $F_{\max} = 3,4$ кГц. Аналоговий сигнал нормований так, що $|b(t)|_{\max} = 1$.

У макетах кодерів ІКМ і ДІКМ частота дискретизації встановлена 8 кГц. Ці макети дозволяють установлювати довільне число рівнів квантування. На рис. 8 у макеті для дослідження методу ДІКМ використано L -й цифровий канал зв'язку (ЦКЗ).

У макеті кодера ДМ можна установити частоту дискретизації 16, 32, 48 і 64 кГц. Цей макет допускає установку довільного кроку квантування.

7 Вимоги до звіту

7.1 **Назва** лабораторної роботи.

7.2 **Мета** лабораторної роботи.

7.3 **Результати** виконання домашнього завдання.

7.4 **Результати** виконання п. 5.2...5.5 лабораторного завдання (таблиці, графіки).

7.5 **Висновки** за кожним пунктом лабораторного завдання, в яких дати аналіз отриманих результатів – збіг теоретичних і експериментальних даних тощо.

7.6 **Дата**, підпис студента, віза викладача з оцінкою за 100-бальною шкалою.

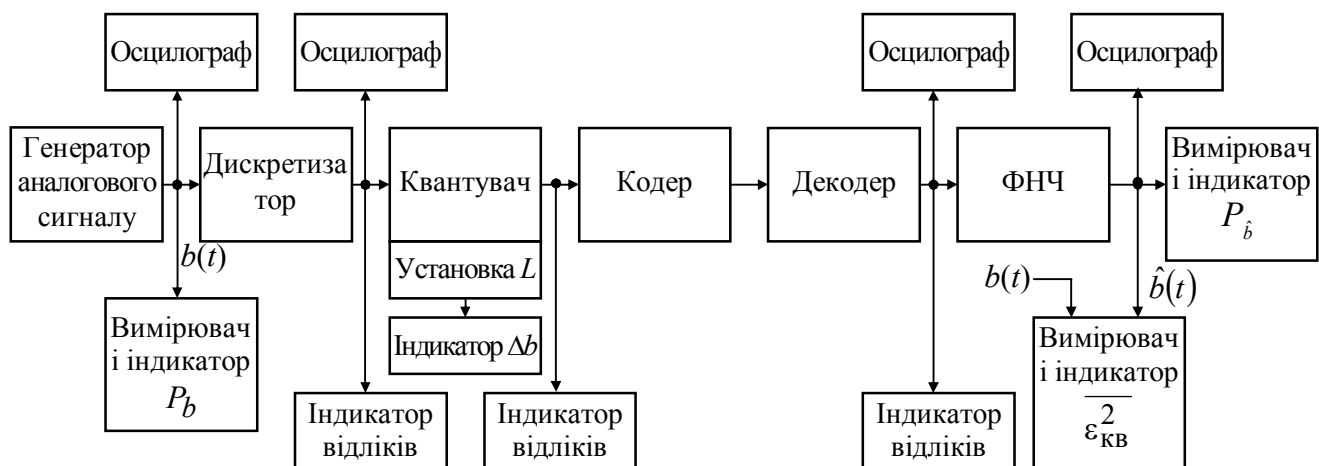


Рисунок 7 – Схема макета для дослідження методу ІКМ

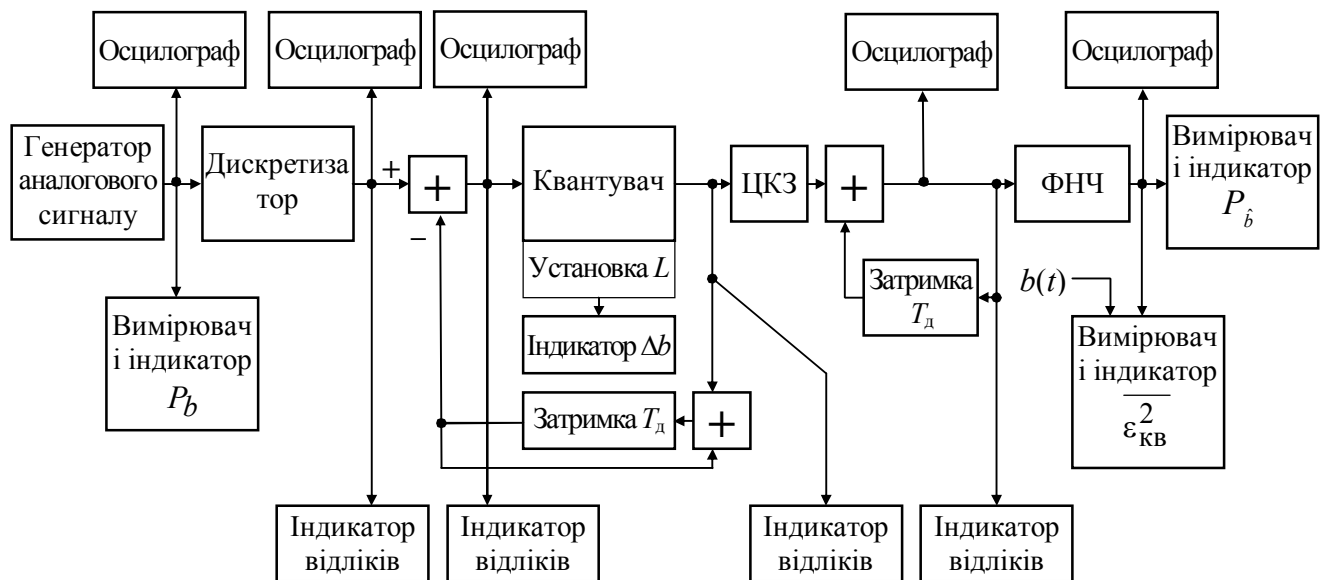


Рисунок 8 – Схема макета для дослідження методу ДІКМ

$$\begin{matrix} \hat{b}(t) \\ \hat{b}(kT_d) \end{matrix}$$