

11. ГОСТ 18683.2-83 Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения динамических электрических параметров.

12. Ліщинська Л.Б. Удосконалений метод "плаваючого навантаження" вимірювання параметрів імітансної матриці чотириполюсника / Л.Б. Ліщинська // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвід. наук.-техн. зб. - 2011. - Вип. 72. - С. 153.

13. Роде и Шварц (Rohde&Schwarz). Контрольно-измерительное оборудование. Режим доступа: [http://www.rohde-schwarz.ru/products/test\\_and\\_measurement/](http://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/)

## References

1. Lishhyn'ska L.B. Imitansnalogika / L.B. Lishhyn'ska, M.A. Filinjuk // Informacijni tehnologii' ta komp'juterna inzhenerija. - 2010. - №2(18). - S. 25-31.
2. Nejman M.S. O sverhvysochastotnojvychislitel'nojpreryvnojavtomatike / M. S. Nejman // Jelektronnye radioimpul'snye vychislitel'nye sistemy diskretnogo dejstvija. Trudy MAI. - 1962. - Vyp. 149. - S. 3-8.
3. Knorre K. G. Fazovye I chastotnye SVCh jelementy / K. G. Knorre, V. M. Tuzov, G. I. Shur. - M.: Sov. radio, 1975. - 352 s.
4. Kychak V. M. Syntez chastotno-impul'snyh elementiv cyfrovoi' tehniky: monografija / V. M. Kychak. - Vinnycja: UNIVERSUM - Vinnycja, 2005. - 266 s. - ISBN 966-641-137-7.
5. Presnuhin L.N. Cifrovyevychislitel'nyemashiny / L. N. Presnuhin, P. V. Nesterov. - M.: Vysshajashkola, 1981. - 511 s.
6. Filinjuk N. A. Aktivnye UKV fil'try / N. A. Filinjuk. - M.: Radio isvjaz', 1984. - 56 s.
7. Lishhyn'ska L. B. Ocinkaosnovnyhparametrivimitansnyhlogichnyhelementiv / L. B. Lishhyn'ska // Informacijnietechnologii' ta komp'juternainzhenerija. - 2011. - № 3 (22). - S. 45-52.
8. Lishhinskaja L. B. Ocenkapomehoustojchivostiimitansnyhlogicheskijhelementov / L. B. Lishhinskaja // Radiotehnikaiejlektronika. - 2013. - T. 58, №11. - S. 1136-1142
9. Rollett J. Stability and power gain invariants of linear two-ports / J. Rollett // IRE Trans. Circuit Theory. - 1962. - Vol. CT-9, № 3. - P. 29-32.
10. GOST 18683.1-83 Mikroschemyintegral'nyecifrovye. Metodyizmerenijastatisticheskijelektricheskijparametrov.
11. GOST 18683.2-83 Mikroschemyintegral'nyecifrovye. Metodyizmerenijadinamicheskijelektricheskijparametrov.
12. Lishhyn'ska L.B. Udokonalenyjmetod "plavajuchogonavantazhenja" vymirjuvanjaparametrivimitansnoi' matrycichtyrypoljusnyka / L.B. Lishhyn'ska // Vymirjuval'natehnika ta metrologija :mizhvid. nauk.-tehn. zb. - 2011. - Vyp. 72. - S. 153.
13. Rode iShvarc (Rohde & Schwarz). Kontrol'no-izmeritel'noeoborudovanie. Rezhimdostupa: [http://www.rohde-schwarz.ru/products/test\\_and\\_measurement/](http://www.rohde-schwarz.ru/products/test_and_measurement/)

Рецензія/Peer review : 20.7.2013 р.

Надрукована/Printed :14.10.2013 р.

УДК 681.325

В.В. КИЧАК, М.Д. ГУЗЬ

Вінницький національний технічний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕХОДІВ ДЖОЗЕФСОНА ДЛЯ ПОБУДОВИ ПРИБОРІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІМПУЛЬСНО-ПОТЕНЦІАЛЬНОГО КОДУ В ЧАСТОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ

*В статті запропонована схема пристрою перетворення імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний на базі переходів Джозефсона із використанням явища надпровідності. Наведена еквівалентна схема даного пристрою та проаналізовано принцип її функціонування. Показана залежність періоду надвисокочастотних коливань від величини постійної напруги, прикладеної до переходів Джозефсона, та від значення нелінійного опору переходу Джозефсона.*

*Ключові слова: перехід Джозефсона, імпульсно-потенційний код.*

V. V. KYCHAK, M. D. GUZ  
Vinnitsa National Technical University

### THE APPLICATION OF THE JOSEPHSON JUNCTIONS FOR CONSTRUCTION OF THE DEVICES OF CONVERSION PULSE-POTENTIAL CODE INTO FREQUENCY-PULSE CODE

*In article is proposed a scheme of the device of conversion pulse-potential code into frequency-pulse code based on the Josephson junctions using the phenomenon of superconductivity. The equivalent scheme of the device is shown and the principle of its operation is analyzed. The dependence of ultrahigh frequency oscillation period of constant voltage applied to the Josephson junctions and the value of the nonlinear resistance of the Josephson transition is shown.*

*Keywords: transition Josephson, pulse-potential code.*

#### Вступ

Застосування частотно-імпульсного представлення інформації для побудови цифрових радіотехнічних пристроїв забезпечує підвищення завадостійкості та швидкості перетворення інформації за рахунок переходу в діапазон надвисоких частот та кодування логічних станів різними значеннями частот.

Проте, як показано в [1], для реалізації таких пристроїв необхідні джерела допоміжних сигналів, частота яких повинна перевищувати в декілька разів частоту інформаційних сигналів, що ускладнює їх реалізацію в міліметровому та субміліметровому діапазонах хвиль з використанням сучасних напівпровідникових технологій. Крім того, оскільки сучасна обчислювальна техніка орієнтована переважно на використання імпульсно-потенціального представлення інформації, застосування частотно-імпульсного

кодування в деяких випадках потребує розробки пристроїв, які забезпечують перетворення імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний.

Великі перспективи для розробки цифрових радіотехнічних пристроїв з частотно-імпульсним представленням інформації та використання багатозначності відкривають джозефсонівські елементи, оскільки вони характеризуються високою швидкістю, високою чутливістю та вкрай низькою енергією перемикання порядку  $10^{-18}$  Дж/біт, що на п'ять порядків нижче граничної енергії перемикання для елементів на базі напівпровідників, яка становить  $10^{-13}$  Дж/біт [2]. Характерна частота джозефсонівських елементів на базі низькотемпературних надпровідників лежить в діапазоні сотень гігагерц, а високотемпературних надпровідників може досягати одиниць і навіть десятків терагерц [3].

Так застосування джозефсонівських переходів в схемах параметричних підсилювачів дозволяє отримати чутливість пристроїв, близько до квантової межі на частотах від одиниць до сотень гігагерц. Змішувачі на базі тунельних джозефсонівських переходів не мають рівних собі аналогів по шумовій температурі в частотному діапазоні 100 – 500 ГГц [4]. Джозефсонівські елементи дають можливість створити вузькосмугові генератори сигналів міліметрового та субміліметрового діапазону хвиль, які перелаштовуються та характеризуються малими габаритами і дуже малою потужністю, що ними споживається [5].

### Постановка задачі досліджень

В цій праці необхідно розробити та дослідити пристрій, який здійснює перетворення двійкового імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний, оцінити величину напруги високочастотних коливань та залежність періоду коливань від постійної напруги на тунельному переході Джозефсона та шунтуючого опору.

### Розв'язання задачі

Функціональна схема пристрою, який здійснює перетворення двійкового імпульсно-потенціального коду в двійковий частотно-імпульсний на базі двох переходів Джозефсона приведена на рис. 1.

При відсутності вхідних сигналів обидва переходи перебувають у стані надпровідності і струми, що протікають через джозефсонівські переходи, нижче критичних. При подачі імпульсу напруги, яка відповідає логічній «1» на вхід 1, має місце генерація надвисокочастотних коливань, частота яких визначається за виразом

$$\omega = \frac{2 \cdot q}{\hbar} \cdot U_0.$$

При відсутності імпульсу на другому вході сигнал на виході відповідає логічній «1» і являє собою радіоімпульс з деякою частотою заповнення  $\omega_1$ . При подачі імпульсу напруги на другий вхід і відсутності сигналу на першому вході, другий перехід переходить в режим генерації коливань і на виході має місце радіоімпульс, частота якого відповідає логічній «1». При подачі імпульсів напруги на кожний із входів переходи переходять в режим нестационарного ефекту Джозефсона і на виході має місце радіоімпульс, частота заповнення якого відповідає логічній «1».

При відсутності сигналів на входах, що відповідає логічному «0», на виході сигнал також відсутній. Тобто в цьому випадку має місце перетворення двійкового імпульсно-потенціального коду в двійковий частотно-імпульсний код при умові, що логічній одиниці відповідає радіоімпульс з деякою частотою заповнення, а логічному «0» – відсутність сигналу. При цьому наведена схема виконує функцію «АБО» та здійснює перетворення імпульсно-потенціального сигналу в радіоімпульсний.

У випадку, якщо логічному «0» і «1» відповідають радіоімпульси різних частот, тоді на переходи Джозефсона необхідно подавати імпульси з різною величиною напруги.

Розглянемо, як змінюється струм джозефсонівських переходів при зміні напруги на них. В загальному випадку величина струму визначається із рівняння Джозефсона

$$I = I_0 \cdot \sin \Phi(t), \quad (1)$$

де  $I_0$  – струм надпровідності, або критичний струм;

$\Phi$  – різниця фаз хвильових функцій куперівських пар по різні сторони джозефсонівського контакту.

Враховуючи залежність різниці фаз хвильових функцій від напруги і часу, вираз (1) можна записати так:

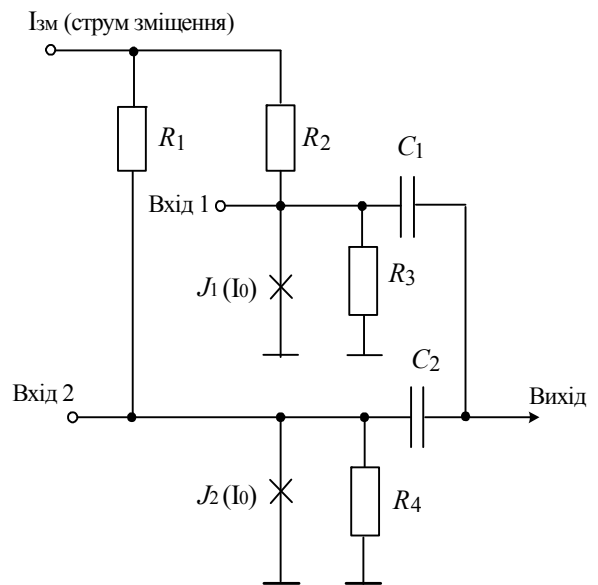


Рис. 1. Функціональна схема пристрою перетворення

$$I = I_0 \cdot \sin \Phi(t) = I_0 \cdot \sin \left[ \Phi(0) + \frac{q}{\hbar} \int_0^t U(t) dt \right]. \quad (2)$$

Якщо до переходу прикладається невелика постійна напруга, то вираз (2) приймає вигляд

$$I = I_0 \cdot \sin \left[ \Phi(0) + \frac{q \cdot U}{\hbar} t \right]. \quad (3)$$

В загальному випадку тунельний елемент в реальному джозефсонівському контакті шунтується ємністю, яка приводить до гістерезисної вольт-амперної характеристики. Це явище небажане і від нього позбавляються шляхом шунтування контакту опором [6]. В нашому випадку цю роль виконують резистори  $R_5, R_6$ . З урахуванням цього еквівалентну схему пристрою перетворення двійкового імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний зображено на рис. 2. В даній схемі  $C_1, C_2$  – електростатичні ємності тунельних переходів Джозефсона,  $R_3, R_4$  – нелінійні опори джозефсонівських переходів;  $R_5, R_6$  – шунтуючі опори.

Для розрахунку напруги на виході при дії імпульсно-потенціальних сигналів на вході визначимо напругу окремо для кожної із ділянок схеми на рис. 2. Використовуючи еквівалентну схему, визначимо струми, що протікають через переходи Джозефсона.

Враховуючи, що  $R_3 \ll R_5$ , а  $R_4 \ll R_6$ , вираз для струму можна записати так

$$I = I_0 \cdot \sin \Phi + \frac{U}{R_3} + C \cdot \frac{dU}{dt}. \quad (4)$$

Оскільки  $\frac{d\Phi}{dt} = \frac{2 \cdot q}{\hbar} \cdot U$ , то вираз (4) можна переписати у вигляді

$$\frac{I}{I_0} = \sin \Phi + \frac{d\Phi}{dx} + \beta \cdot \frac{d^2\Phi}{dx^2}, \quad (5)$$

де  $x = \frac{2 \cdot q \cdot I_0 \cdot R_3}{\hbar} \cdot t, \Phi = \frac{2 \cdot q \cdot U \cdot t}{\hbar}, \beta = \frac{x}{t} \cdot R_3 \cdot C,$

Для випадку, коли подається напруга на перехід Джозефсона і  $I > I_0$ , величину опору  $R_3$  можна розрахувати за виразом [5]:

$$R = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot U^2}{q^2 \cdot \mu}.$$

Розв'язуючи (5) чисельними методами, можна розрахувати залежність вихідної змінної напруги від постійної напруги на джозефсонівському переході, а також час перемикання та енергію, яка витрачається на перемикання. Отримати аналітичну залежність змінної напруги від постійної напруги на переході можна шляхом спрощення рівняння (4). Якщо покласти, що ємність переходу має дуже малу величину і нею нехтувати, то вираз для струму буде мати вигляд

$$\frac{I}{I_0} = \sin \Phi + \frac{d\Phi}{dx}. \quad (6)$$

Рівняння (6) можна переписати у вигляді

$$\frac{d\Phi}{I/I_0 - \sin \Phi} = dx. \quad (7)$$

Розв'язок цього рівняння показує, що похідна  $d\Phi/dt$  є неперервною і періодичною функцією з періодом [7]

$$T = \frac{\pi \cdot \hbar}{q \cdot R \cdot I_0 \cdot \left[ (I/I_0)^2 - 1 \right]^{1/2}}. \quad (8)$$

Враховуючи це, середню величину напруги за період можна розрахувати за виразом

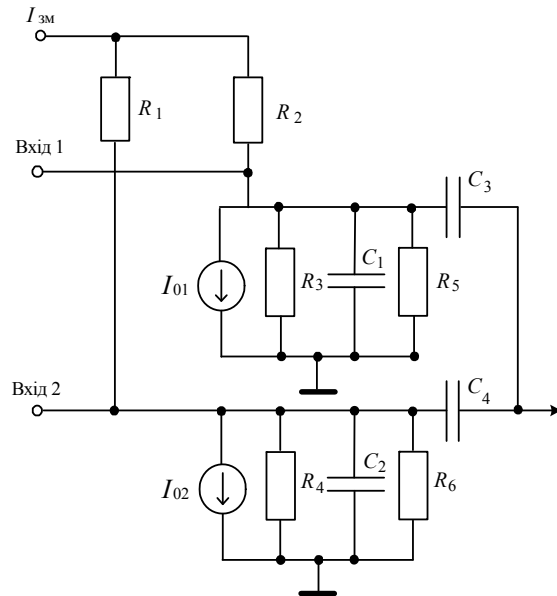


Рис. 2. Еквівалентна схема пристрою перетворення імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний

$$U_{cep} = I_0 \cdot R_3 \cdot \left[ \left( I/I_0 \right)^2 - 1 \right]^{1/2}.$$

Залежність періоду коливань від прикладеної до джозефсонівського переходу постійної напруги можна розрахувати підставивши (4) в (8)

$$T = \frac{\pi \cdot \hbar}{q \cdot R \cdot I_0 \cdot \left[ \left( \frac{I_0 \cdot \sin \left( \frac{2 \cdot q \cdot U \cdot t}{\hbar} \right) + \frac{U}{R}}{I_0} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}}. \quad (9)$$

Аналіз останнього виразу вказує на те, що період надвисокочастотних коливань залежить як від величини постійної напруги, прикладеної до переходу Джозефсона, так і від нелінійного опору переходу та відповідно від шунтуючого опору, оскільки вони на еквівалентній схемі вмикаються паралельно.

Виконаємо комп'ютерне моделювання залежності періоду НВЧ коливань від постійної напруги, прикладеної до переходу Джозефсона, і від нелінійного опору переходу відповідно до виразу (9), приймаючи значення критичного струму переходу  $I_0$  величиною 1 мА. Залежність періоду коливань від прикладеної до переходу Джозефсона постійної напруги при різних значеннях нелінійного опору переходу подано на рис. 3.

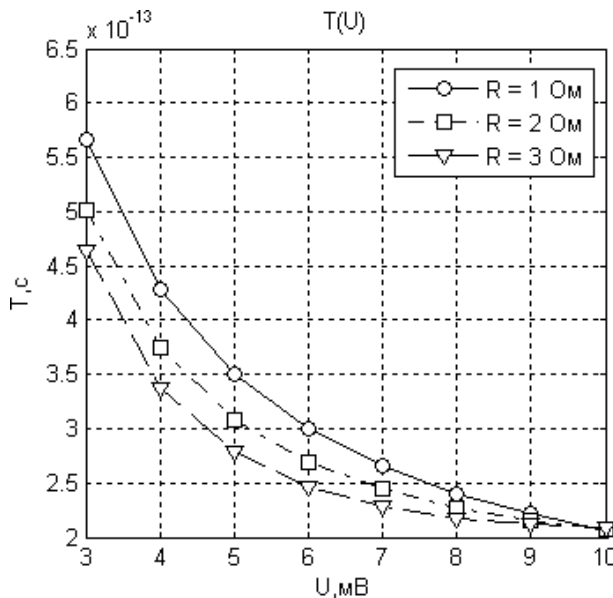


Рис. 3. Залежність періоду коливань від прикладеної до переходу Джозефсона постійної напруги

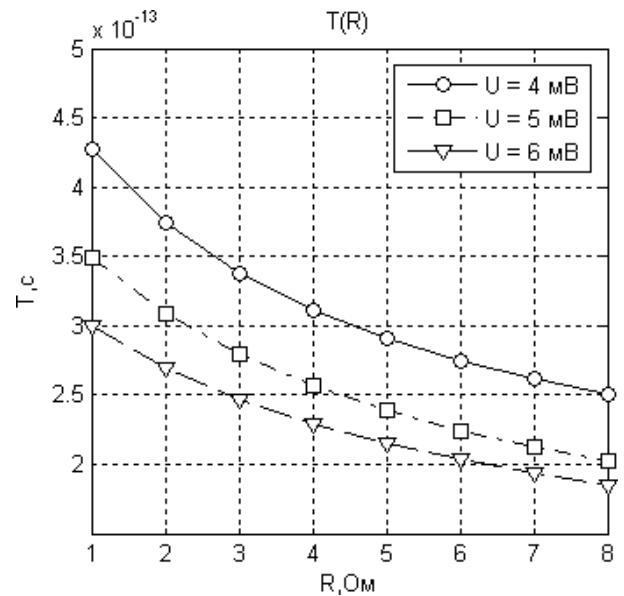


Рис. 4. Залежність періоду коливань від нелінійного опору переходу Джозефсона

Аналізуючи дану графічну залежність можна зробити висновок, що збільшення величини прикладеної до переходу Джозефсона постійної напруги приводить до зменшення періоду НВЧ коливань, тобто, збільшення їх частоти. Аналогічно продемонструємо залежність періоду коливань від нелінійного опору переходу Джозефсона при різних значення прикладеної до нього постійної напруги (рис. 4).

З даного графіку видно, що нелінійний опір джозефсонівського переходу обернено пропорційний періоду коливань, і тому прямо пропорційний частоті коливань. Дані дослідження відображають можливості підвищення частоти генерації джозефсонівських переходів до десятків терагерц.

### Висновки

Запропонована структурна схема пристрою перетворення двійкового імпульсно-потенціального коду в частотно-імпульсний з використанням переходів Джозефсона та розроблено його еквівалентну схему.

Отримано аналітичний вираз для розрахунку напруги на джозефсонівському переході з урахуванням його нелінійного опору. Показано, що період високочастотних коливань, а відповідно і частота, залежать від постійної напруги та від нелінійного опору джозефсонівського переходу і шунтуючого опору.

### Література

1. Кичак В. М. Синтез частотно-імпульсних елементів цифрової техніки / В. М. Кичак. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 292 с.

2. Корнев В. К. Эффект Джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике / В. К. Корнев // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7. – № 8. – С. 83-90.
3. Калашников К. В. Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник / К. В. Калашников, А. В. Худченко, А. Б. Барышев, В. П. Кошелец // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – № 6. – С. 1-9.
4. Шитов С. В. Малошумящий СИС-смеситель на частоту 1 THz с двойной дипольной антенной / С. В. Шитов, А. М. Марков, Б. Д. Джексон и др. // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – № 9. – С. 87-92.
5. Кулик И. О. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах / И. О. Кулик, И. К. Янсон. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
6. Сугано Т. Введение в микроэлектронику / Т. Сугано, Т. Икома, Е. Такэиси: Пер. с яп. – М.: Мир, 1988. – 320 с.
7. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Букингем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 399 с.

## References

1. Kychak V. M. Syntez chastotno-impulsnyh elementiv tsifrovoi tekhniki / V. M. Kychak. Monographiya. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2005. – 292 s.
2. Kornev V. K. Effekt Josephsona I ego primenenie v sverhprovodnikovoy elektronike / V. K. Kornev // Sorosovskiy obrazovatel'nyy jurnal. – 2001. – Т. 7. – № 8. – С. 83-90.
3. Kalashnikov K. V. Garmonicheskyy smesitel' na tunnel'nom perehode sverhprovodnik-izolyator-sverhprovodnik / K. V. Kalashnikov, A. V. Hudchenko, A. B. Baryshev, V. P. Koshelets // Radiotekhnika i elektronika. – 2011. – Т. 56. – № 6. – С. 1-9.
4. Shtyov S. V. Maloshumyashchiy SIS-smesitel' na chastotu 1 THz s dvoynoy dipol'noy antennoy / S. V. Shtyov, A. M. Markov, B. D. Jekson I dr. // Jurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2002. – Т. 72. – № 9. – С. 87-92.
5. Kulik I. O. Effekt Josephsona v sverhprovodyaschih tunnel'nyh strukturah / I. O. Kulik, I. K. Yanson. – М.: Nauka, 1970. – 272 s.
6. Sugano T. Vvedenie v mikroelektroniku / T. Sugano, T. Ikoma, E. Takeisi: Per. s yap. – М.: Mir, 1988. – 320 s.
7. Bukingem M. Shumy v elektronnyh priborah i sistemah / M. Bukingem: Per. s angl. – М.: Mir, 1986. – 399 s.

Рецензія/Peer review : 17.7.2013 р.

Надрукована/Printed :14.10.2013 р.

Рецензент: д. т. н., проф. кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури  
Вінницького національного технічного університету Філінюк М. А.

УДК 621.391

І.С. ПЕРЕКРЕСТОВ, Л.М. БОРЩОВА

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

### ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ В РАДІОКАНАЛАХ З РІЗНИМИ ФОРМАМИ РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРА

*В роботі здійснено аналіз форми, масштабів та швидкості змін параметрів сигналів на виході багатопроменевих радіоканалів мобільних користувачів при різних варіантах доплерівського розширення спектра. Визначено, що у порівнянні майже з усіма варіантами розширення спектра при класичному розширенні швидкість змін параметрів сигналу в середньому є найбільшою, при тому, що структура змін є абсолютно різною.*

*Ключові слова: доплерівське розширення спектра, інтервал когерентності, спектральна густина потужності, кореляційна функція.*

I.S. PEREKRESTOV, L.M. BORSCHOVA

Odessa National Academy of Telecommunications by O.S. Popov

### CHANGING OF SIGNAL PARAMETERS IN RADIO CHANNEL AT DIFFERENT FORMS OF THE SPECTRUM SPREADING

*Abstract — In this article the shape, size and rate of changes of signal parameters on the multipath radio channel for mobile users output at different form of the Doppler spectrum spreading are analyzed. Determined that in comparison with almost all forms of spectrum spreading, the rate of signal parameters change on the average is maximal for classic spectrum spreading. The structure of changes is quite different.*

*Keywords: Doppler spectrum spreading, coherence interval, spectral power density, correlation function.*

#### Вступ

Сучасні системи передавання використовують частотні діапазони, які характеризуються багатопроменевим поширенням радіохвиль між передавальною та приймальною антенами. Оскільки довжина шляху розповсюдження променів та коефіцієнти відбиття є випадковими величинами, то в результаті випадковими є параметри сигналу, що демодулюється.

Відомо, що за наявності взаємного руху між передавальним і приймальним обладнанням спостерігається ефект Доплера [1]. Оскільки величина доплерівського зсуву частоти залежить від кута під яким надходить сигнал і, в той самий час, приймальна антена мобільного користувача є ненаправленою, то