

## ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ МАГНІТОТРАНЗИСТОРА ТА АКТИВНО – ІНДУКТИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

*Анотація.* Розроблено математичну модель частотного перетворювача з магнітотранзистором та активним індуктивним елементом, яка складається з біполярного та МДН-транзисторів та двох магнітотранзисторів в якості магніточутливих елементів, на основі якої отримано аналітичні та графічні залежності функції перетворення та рівняння чутливості.

*Ключові слова:* магнітний перетворювач, біполярний транзистор, польовий транзистор, функція перетворення, рівняння чутливості.

O. V. OSADCHUK, O.O. SELETSKA, V.V. MARTYNYUK  
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

### FREQUENCY MAGNETIC TRANSDUCER WITH A MAGNETOTRANSISTOR AND AN ACTIVE INDUCTIVE ELEMENT

*Abstract - The aim of the research - to increase the sensitivity of measurement of magnetic induction.*

*This work presents magnetic transducer with frequency output on the basis of semiconductor structures with negative resistance, the principle of which operation is based on the functional connection of reactive properties of transistor structures with negative resistance from the effects of magnetic induction, which enables creation and development competitive models of this production.*

*The mathematical model of frequency magnetic transducer composed of bipolar and mosfet transistors with transistor as magnetosensitive element and an active inductive element has been developed. On the base of this model analytical and graphical dependencies conversion function and sensitivity equation.*

*Keywords:* magnetic transducer, bipolar transistor, field transistor, conversion function, equation of sensitivity.

#### Вступ

Застосування напівпровідникових структур з від'ємним опором в класичних схемах підсилювальних, перемикаючих, генераторних і логічних пристроїв добре досліджено. Проте застосування магнітореактивного елемента на основі магнітотранзистора в структурах для створення мікроелектронних перетворювачів тільки починається. Існування додаткового каналу зв'язку суттєво підвищує функціональні можливості таких пристроїв, а мікроелектронна технологія дає можливість значно підвищити їх чутливість, діапазон вимірюваних параметрів, швидкодію і надійність [1-3]. В таких перетворювачах транзистор виступає як в якості магніточутливого елемента, так і в якості елемента, який утворює генерацію електричних коливань.

В даній роботі проведені дослідження повного вихідного опору від дії магнітного поля, а також запропоновано схему перетворювача магнітного поля з частотним виходом на основі магніточутливого транзистора та досліджена функція перетворення.

#### Математична модель

На рис. 1 представлена схема магнітного частотного перетворювача з чутливим елементом – магнітотранзистором VT3, яка складається з МДН-транзистора VT1 та біполярного транзистора VT2, живлення яких здійснюють джерела напруги U1 та U2. Роль індуктивної складової виконує біполярний магнітотранзистор VT3 з RC-колом, утвореним конденсатором C2 та резистором R4. Таким чином, коливальний контур утворено ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-стік транзисторів VT2 та VT1 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного магнітотранзистора VT3.

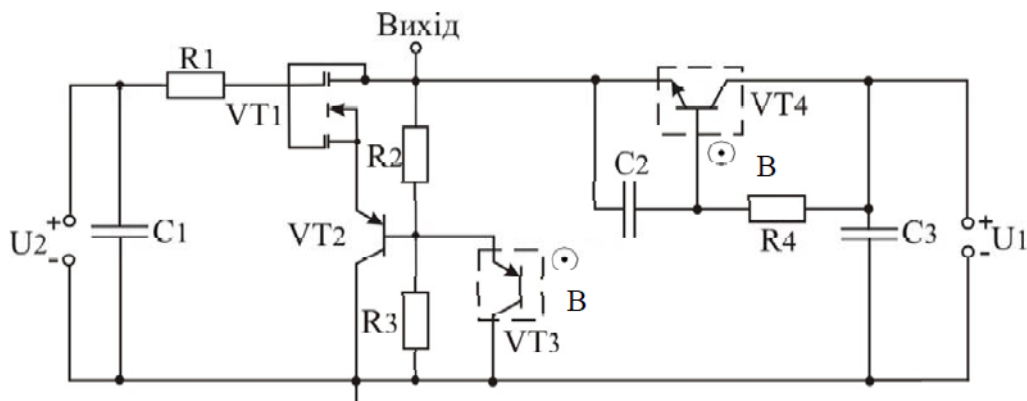


Рис. 1. Електрична схема частотного перетворювача на основі магнітотранзистора та активно-індуктивного елемента

Для визначення функції перетворення перетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах колектор-стік транзисторів VT2 та VT1 згідно з його еквівалентною схемою для змінного струму (рис.2).

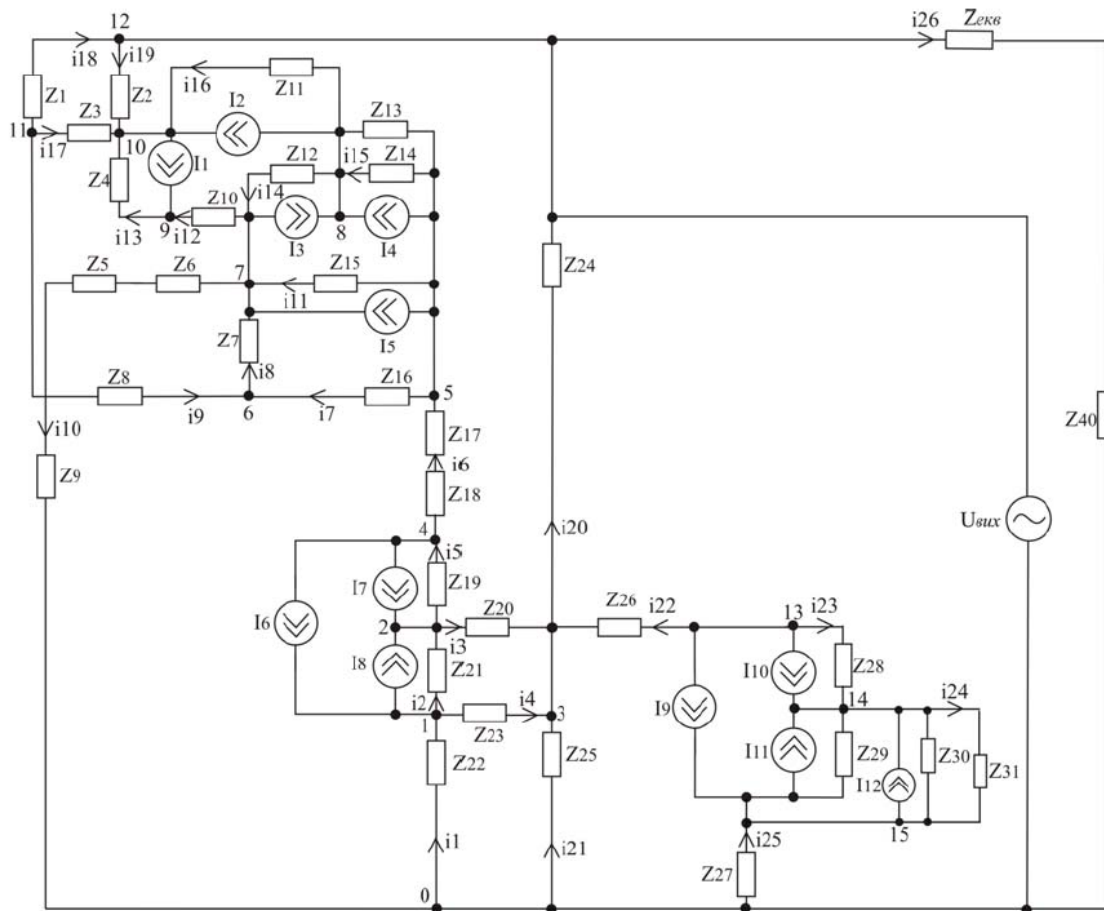


Рис. 2. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

В еквівалентній схемі (рис. 2) використано наступні позначення:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1, \quad Z_2 = R_5, \quad Z_3 = R_2 / (1 + \omega^2 R_2^2 C_4^2) - j R_2^2 \omega C_4 / (1 + \omega^2 R_2^2 C_4^2), \quad Z_4 = R_3, \quad Z_5 = R_4, \quad Z_6 = R_7, \quad Z_7 = -j / (\omega C_8), \\
 Z_8 &= -j / \omega C_7, \quad Z_9 = -j / \omega C_1, \quad Z_{10} = R_6, \quad Z_{11} = -j / (\omega C_3), \quad Z_{12} = -j / (\omega C_5), \quad Z_{13} = R_8, \quad Z_{14} = -j / (\omega C_6), \\
 Z_{15} &= R_9 / (1 + \omega^2 R_9^2 C_9^2) - j R_9^2 \omega C_9 / (1 + \omega^2 R_9^2 C_9^2), \quad Z_{16} = R_{10}, \quad Z_{17} = R_{11}, \quad Z_{18} = R_{12}, \quad Z_{19} = -j / (\omega C_{10}), \quad Z_{20} = R_{13}, \\
 Z_{21} &= -j / (\omega C_4), \quad Z_{22} = R_{14}, \quad Z_{23} = -j / (\omega C_{12}), \quad Z_{24} = R_{15}, \quad Z_{25} = R_{16}, \quad Z_{26} = R_{17}, \quad Z_{27} = R_{20}, \quad Z_{28} = -j / (\omega C_{17}), \\
 Z_{29} &= -j / (\omega C_{18}), \quad Z_{30} = R_{18} / (1 + \omega^2 R_{18}^2 C_{19}^2) - j R_{18}^2 \omega C_{19} / (1 + \omega^2 R_{18}^2 C_{19}^2), \quad Z_{31} = R_{19}, \quad Z_{32} = R_{21}, \quad Z_{33} = -j / (\omega C_2), \\
 Z_{34} &= -j / (\omega C_{13}), \quad Z_{35} = -j / (\omega C_{14}), \quad Z_{36} = R_{22} / (1 + \omega^2 R_{22}^2 C_{15}^2) - j R_{22}^2 \omega C_{15} / (1 + \omega^2 R_{22}^2 C_{15}^2), \quad Z_{37} = R_{23}, \quad Z_{38} = R_{25}, \\
 Z_{39} &= R_{24}, \quad Z_{40} = -j / (\omega C_{16}),
 \end{aligned}$$

де  $R_1$  - опір другого затвору МДН-транзистора VT1;  $R_2$  - опір стік-другий затвор двозатворного МДН-транзистора VT1;  $R_3, R_6, R_9$  - опори виток-стоку двозатворного МДН-транзистора VT1;  $R_4$  - опір резистора  $R_1$  на схемі на рис. 1;  $R_5$  - опір р-п переходу стоку транзистора VT1;  $R_7$  - омичний опір другого затвору двозатворного МДН-транзистора VT1;  $R_8$  - опір підкладки МДН-транзистора VT1;  $R_{10}$  - опір витік-перший затвор двозатворного МДН-транзистора VT1;  $R_{11}$  - опір виток МДН-транзистора VT1;  $R_{12}, R_{17}, R_{21}$  - опори емітера біполярного транзистора VT2 та магнітотранзисторів VT2 та VT3 відповідно;  $R_{13}$  - опір бази біполярного транзистора VT2;  $R_{14}, R_{20}, R_{25}$  - опори колектора біполярного транзистора VT2 та магнітотранзисторів VT2 та VT3 відповідно;  $R_{15}$  - опір резистора  $R_2$  на схемі на рис. 1;  $R_{16}$  - опір резистора  $R_3$  на схемі на рис. ;  $R_{18}$  та  $R_{22}$  - шунтуючий опір, що входить до складу магнітотранзистора VT3 та магнітотранзистора VT4 відповідно;  $R_{19}$  та  $R_{23}$  - опір р-п переходу діода, що входить до складу магнітотранзистора VT3 та магнітотранзистора VT4 відповідно;  $R_{24}$  - опір резистора  $R_4$  на схемі на рис. 3.17.  $C_1, C_2$  та  $C_{16}$  - ємності конденсаторів  $C_1, C_2$  та  $C_3$  на схемі на рис. 1 відповідно;  $C_3$  та  $C_5$  - ємності підкладка-стік МДН-транзистора VT1;  $C_4$  та  $C_9$  - ємності перший затвор-стік МДН-

транзистора VT1;  $C_6$  - ємність підкладка-витік МДН-транзистора VT1;  $C_7$  - ємність між першим і другим затвором МДН-транзистора VT1;  $C_8$  - ємність затвор-стік МДН-транзистора VT1;  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  - ємність переходу база-емітер та база-колектор транзистора VT2 відповідно;  $C_{12}$  - ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT2;  $C_{13}$ ,  $C_{14}$  - ємність переходу база-емітер та база-колектор магнітотранзистора VT4 відповідно;  $C_{15}$  та  $C_{19}$  - ємності р-n переходів діодів магнітотранзисторів VT4 та VT3 відповідно;  $C_{17}$ ,  $C_{18}$  - ємність переходу база-емітер та база-колектор магнітотранзистора VT3 відповідно.

Струми,  $I_6$ ,  $I_7$ ,  $I_9$ ,  $I_8$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{11}$ ,  $I_{13}$ ,  $I_{14}$ ,  $I_{15}$ , що входять до складу еквівалентних схем біполярного транзистора VT2 та магнітотранзисторів VT3 і VT4 відповідно та струми МДН-транзистора  $I_1$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{16}$  описані в роботі [4].

Визначення функції перетворення проведено в роботі [5]:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_{\text{екв}}(B)C_{17}(-L_{\text{екв}}(B)C_{17} + R_{19}^2(B)C_{19}^2(B) + R_{19}^2(B)C_{19}(B)C_{17} + A)}}{L_{\text{екв}}(B)C_{19}(B)C_{17}R_{19}(B)}, \quad (3)$$

де

$$A = \sqrt{L_{\text{екв}}^2(B)C_{17}^2 + 2L_{\text{екв}}(B)C_{19}^2(B)C_{17}R_{19}^2(B) - 2L_{\text{екв}}(B)C_{17}^2C_{19}(B)R_{19}^2(B) + R_{19}^4(B)C_{19}^4(B) + 2R_{19}^4(B)C_{19}^3(B)C_{17} + R_{19}^4(B)C_{19}^2(B)C_{17}^2}$$

де  $L_{\text{екв}}$  - значення активного індуктивного елемента, що визначається із формули повного опору.

Чутливість перетворювача визначається за формулою:

$$S = \frac{1}{4} \sqrt{2} \left[ \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right) C_{17} (D_1 + D_2) + L_{\text{екв}}(B) C_{17}^2 \left( - \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right) + 2R_{19}(B) C_{19}^2(B) \times \right. \right. \\ \times \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 2R_{19}^2(B) C_{19}(B) \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) + 2R_{19}(B) C_{19}(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + \\ \left. + R_{19}^2(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) + \frac{1}{2} (2L_{\text{екв}}(B) C_{17}^2 \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right) + 2R_{19}^2(B) C_{19}^2(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right) + \right. \\ \left. + 4L_{\text{екв}}(B) R_{19}(B) C_{19}^2(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 4L_{\text{екв}}(B) R_{19}(B) C_{19}^2(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 4L_{\text{екв}}(B) \times \right. \\ \left. \times R_{19}^2(B) C_{19}(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) - 2R_{19}^2(B) C_{19}(B) C_{17}^2 \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right) - 4L_{\text{екв}}(B) R_{19}(B) C_{19}(B) C_{17}^2 \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) - 2L_{\text{екв}}(B) R_{19}^2(B) C_{17}^2 \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) + 4R_{19}^3(B) C_{19}^4(B) \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 4R_{19}^4(B) C_{19}^3 \times \right. \\ \left. \times (B) \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) + 8R_{19}^3(B) C_{19}^3(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 6R_{19}^4(B) C_{19}^2(B) C_{17} \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) + \right. \\ \left. + 4R_{19}^3(B) C_{19}^2(B) C_{17}^2 \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right) + 2R_{19}^4(B) C_{19}(B) C_{17}^2 \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right) \right] / D_2 \Bigg) / \Bigg) / \\ \left( \sqrt{L_{\text{екв}}^2(B) C_{19}(B) R_{19}(B) C_{17}^2 (D_1 + D_2)} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(B) C_{17} (D_1 + D_2) \left( \frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(B) \right)}{L_{\text{екв}}^2(B) R_{19}(B) C_{19}(B) C_{17}}} - \\ - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(B) C_{17} (D_1 + D_2) \left( \frac{\partial}{\partial E} R_{19}(B) \right)}{L_{\text{екв}}(B) R_{19}^2(B) C_{19}(B) C_{17}}} - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(B) C_{17} (D_1 + D_2) \left( \frac{\partial}{\partial E} C_{19}(B) \right)}{L_{\text{екв}}(B) R_{19}(B) C_{19}^2(B) C_{17}}},$$

де

$$D_1 = -L_{\text{екв}}(B) C_{17} + R_{19}^2(B) C_{19}^2(B) + R_{19}^2(B) C_{19}(B) C_{17}; \\ D_2 = \sqrt{L_{\text{екв}}^2(B) C_{17}^2 + 2L_{\text{екв}}(B) C_{17} R_{19}^2(B) C_{19}^2(B) - 2L_{\text{екв}}(B) C_{17}^2 R_{19}^2(B) C_{19}(B) + 2R_{19}^4(B) C_{19}^4(B) + 2R_{19}^4(B) C_{19}^3(B) C_{17} + R_{19}^4(B) C_{19}^2(B) C_{17}^2}.$$

Залежність частоти генерації від величини магнітного поля, визначена експериментально та розрахована за формулою (3) для різних напруг керування подано на рис. 1.

З графіка видно, що із збільшенням величини магнітного поля спостерігається зростання частоти генерації.

На рис. 2 показана залежність чутливості магнітного перетворювача від індукції магнітного поля.

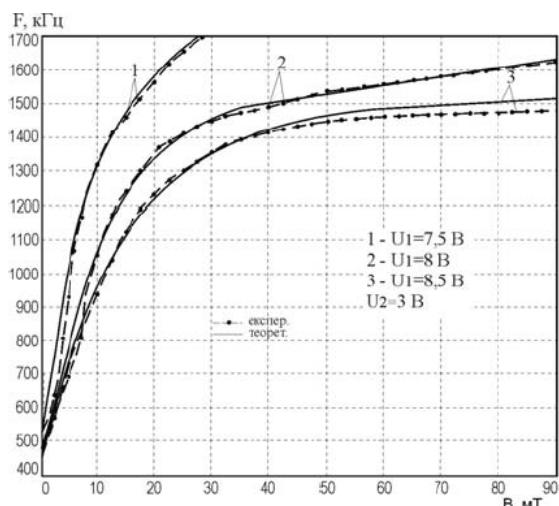


Рис. 1. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації магнітного перетворювача з магнітотранзистором та активним індуктивним елементом від зміни величини магнітного поля

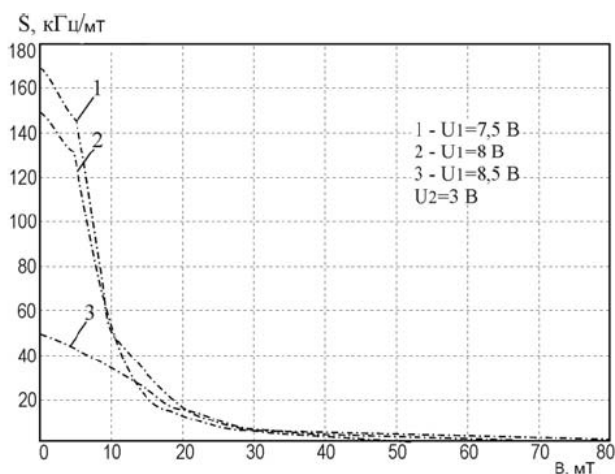


Рис. 2. Залежність чутливості магнітного перетворювача з магнітотранзистором та активним індуктивним елементом від величини індукції

З рис. 2 видно, що максимальну чутливість магнітний перетворювач з магнітотранзистором має при напрузі живлення 7,5 В та напрузі керування 2 В. Із зміною індукції від 5 до 10 мТ, чутливість змінюється від 150 до 50 кГц/мТ.

### Висновки

Розроблена математична модель частотного перетворювача, на основі автогенератора з біполярного то польового транзисторів з магнітотранзистором в якості чутливого елемента та активним індуктивним елементом. На основі моделі отримано аналітичні та графічні залежності функції перетворення та рівняння чутливості від індукції магнітного поля.

### Література

1. Новицкий П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников // Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
3. Осадчук В. С. Оптичний мікроелектронний перетворювач з фототранзистором для контролю плазмохімічних процесів / В. С. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька // Вісник ХНУ. – №5. – 2009. – С.226-231.
4. Викулин И. М. Двухколлекторные магнитотранзисторы / И. М. Викулин, М. А. Глауберман, Г. А. Егиазарян // ПиСУ. – 1981. – №10. – С. 34 – 35.
5. Осадчук О. В. Частотний перетворювач на основі магнітотранзистора та активно-індуктивного елемента / О. В. Осадчук, О. О. Селецька, В. В. Мартинюк // ВОТТІ – №3. – 2015. – С.91-95.

### References

1. Noviczkiy P.V. Cifrovyye pribory s chastotny'mi datchikami / P. V. Noviczkiy, V. H. Knoring, V. S. Gutnikov // L.: E'nergiya, 1970. – 424 s.
2. Osadchuk O.V. Mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom / O. V. Osadchuk –Vinnytsia: «Yuniversity-Vinnytsia», 2000. – 303 s.
3. Osadchuk V. S. Optychniy mikroelektronnyy peretvoriuvach z fototranzistorom dlia kontroliu plazmokhimichnykh protsesiv / V. S. Osadchuk, Yu. S. Kravchenko, O. O. Seletska // Visnyk KhNU. – №5. – 2009. – S. 226-231.
4. Vikulin I. M. Dvukhkollektorny'e mahnitotranzistory' / I. M. Vikulin, M. A. Hlauberman, H. A. Ehiazarian // PiSU. – 1981. – №10. – S. 34 – 35.
5. Osadchuk O. V. Chastotnyi peretvoriuvach na osnovi magnitotranzystora ta aktyvno-induktyvnogo elementa / O. V. Osadchuk, O. O. Seletska, V. V. Martyniuk // VOTTP – №3. – 2015. – S. 91-95.

Рецензія/Peer review : 12.11.2015 р.

Надрукована/Printed :25.3.2016 р.