

2. Boiko J.M. Modeluvannya cifrovih kanaliv peredavannya informacii iz zavadostiikim koduvannyam /Boiko J.M., Boryachok R.O. // IV Miznarodna naukoivo-praktichna konferenciya "Obrobka signaliv i negausivs'kich procesiv". – Cherkasi. CDTU 22 – 24 travnya -2013.
3. Boiko J.M. Improving effectiveness for processing signals in data transmission channels with phase manipulation //23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" September 9-13, 2013, Sevastopol.
4. Juliy Boiko, Victor Stetsiuk, Victor Michan. Improving noise immunity of QPSK demodulation of signals in digital satellite communication systems //TCSET'2012 IEEE. 21-24 February, Lviv – Slavske.
5. Boiko J.M. Sistemativizaciya pokaznikov rozrachunku energetichnogo budzetu linii "Suputnikovii retranslator Metop/Fengyun – nazemna stanciya". IV – I Miznarodnii radioelektronnyi forum: prikladna radioelektronika. Stan i perspektivi rozvitku" MMF-2011., Vol. 1, Chast 2, Kharkiv "KNURE", 2011, pp. 42-46.
6. Shinkaruk O.M., Boiko J.M., Chesanovskii I.I. Osnovi funkcionuvannya bagatokanalnich sistem peredachi informacii: navch. posibnik dlya studentiv vichich navchalnich zakladiv. Khmel'nitskii, KNU, 2011. – 245 p.
7. Boiko J.M. Doslidzennya sposobiv zavadostiikogo koduvannya dla zahistu vid pomilok u cifrovih kanalach peredavannya informacii /J.M. Boiko, D.A. Makarychkin *Visnik Khmel'nitskogo nacionalnogo universitetu* 2013, No. 2, pp. 123 - 130.
8. Boiko J.M. Stetsiuk V.I. Schematic features of use frequency synthesizer on receiving channel digital /J.M. Boiko, V.I. Stetsiuk *Visnik Khmel'nitskogo nacionalnogo universitetu* 2013, No. 5, pp. 219 - 229.

Рецензія/Peer review : 25.10.2013 р. Надрукована/Printed :24.11.2013 р.

Рецензент:

УДК 621.385.6

А.С. КАШТАЛЬЯН

Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ З ДІОДНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Проведено дослідження метрологічних характеристик діодних сенсорів НВЧ електромагнітного поля. Зокрема, розглянуто залежності чутливості за напругою діодних сенсорів в динамічному діапазоні. А також досліджено вплив дестабілізуючих факторів на точність вимірювань.

Ключові слова: діодний сенсор, чутливість за напругою, дестабілізуючі фактори, функція вимірювального перетворення.

A.S. KASHTALIAN

Khmel'nitsky National University, Khmel'nitsky, Ukraine

THE DETERMINATION OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF MEASURE CHANALS WITH DIODE SENSORS

Abstract. The investigation of metrological characteristics of microwave electromagnetic field diode sensors is conducted in article. Metrological characteristics of measuring converter and measuring channel are primary component of initial information for estimation of information-measuring systems metrological characteristics, as a part of these systems. Such descriptions of measuring diode sensors as measure error, conversion function of measuring channel with diode sensor, destabilizing factors influence function are examined for metrological reliability evaluation. Measuring conversion function is researched in dynamic range to 10mW, the dependence of output voltage from input power and the dependence of voltage sensitivity from input power are received. The influence of destabilizing factors is explored: for observable microwave electromagnetic field in range from 0,3GHz to 3GHz; for surrounding environment temperature in range from 0°C to 50°C; for semiconductor junction serial resistance in corresponding to diode models ranges. Derived relations permit to compare common diode detectors, which are used only for electromagnetic field detection, and improved diode sensors with error correction, which are applicable for measuring of microwave electromagnetic field intensity. The parametric feedback method, the structural balancing method, the weak feedback method are used for accuracy increase in improved diode sensors.

Key words: diode sensor, voltage sensitivity, destabilizing factors, measuring conversion function.

Постановка задачі. Метрологічною надійністю вважається здатність вимірювального засобу, зокрема інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), зберігати свої метрологічні характеристики в межах встановлених норм при експлуатації в заданих режимах роботи та умовах використання, збереження та транспортування. Метрологічні характеристики вимірювального перетворювача (ВП) та вимірювального каналу (ВК) є основною складовою частиною вихідної інформації для розрахунку метрологічних характеристик ІВС, в склад яких вони входять [1]. Для оцінки метрологічної надійності необхідно отримати ряд метрологічних характеристик, достатній для визначення результатів вимірювання та оцінки із заданою точністю характеристик інструментальних складових похибок вимірювання [2].

Комплекс метрологічних характеристик, встановлений для вимірювального діодного перетворювача (ВДП), призначений для кількісної оцінки метрологічної надійності ІВС, до складу якої входять [3]. Для оцінки метрологічної надійності ІВС розглянуто такі метрологічні характеристики ВДП: похибка вимірювання; функція перетворення ВК із діодним сенсором; функції впливу дестабілізуючих факторів.

Аналіз досліджень та публікацій. Метрологічні характеристики було досліджено в процесі моделювання та на основі експериментальних зразків. Моделювання виконано за допомогою пакету прикладних програм AWR Design Environment, призначеного для розробки лінійних та нелінійних надвисокочастотних пристроїв, трьохвимірного електромагнітного моделювання багатопланових структур, моделювання пристроїв аналого-цифрової обробки сигналів. Експериментальний зразок ВК з ВДП було розроблено на основі мікроконтролера ATmega128 (Atmel), обчислювальними засобами якого реалізовано методи підвищення метрологічної надійності та точності. Вдосконалений діодний сенсор НВЧ електромагнітного поля використовує такі методи підвищення точності: метод параметричного від'ємного зворотного зв'язку [4], метод структурного

симетризування [5], метод слабких зворотних зв'язків [6]. Було використано зовнішній дванадцятирозрядний АЦП AD7922 (Analog Devices) та зовнішній дванадцяти розрядний ЦАП AD5322 (Analog Devices).

Дослідження метрологічних характеристик діодних перетворювачів. Проведено порівняльний аналіз ВК із діодними перетворювачами, в яких використано методи підвищення точності із діодними сенсорами, що випускаються серійно. Для дослідження було застосовано діоди Шоткі: SMS7621 (Alfa Industries), HSMS2665 (Agilent Technologies), HSMS2802 (Agilent Technologies). У моделюванні використані SPICE моделі виробників (рис. 1), які відображають реальні характеристики діодів, створені спеціально для використання в середовищі AWR Design Environment.

Діоди призначені для детектування слабких сигналів і мають схожі характеристики, але параметри еквівалентних схем відрізняються. Для ефективного використання моделі діода необхідно врахувати параметри корпусу детекторної секції. Це здійснено шляхом додання до схеми заміщення діода Шоткі зосереджених елементів: ємкостей і індуктивностей, які відображають вплив корпусу на роботу діода.

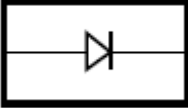
	SMS7621	HSMS2665	HSMS2802
	$IS = 4 \cdot 10^{-8} A$	$IS = 5 \cdot 10^{-8} A$	$IS = 3 \cdot 10^{-8} A$
	$R_S = 12 \Omega$	$R_S = 5 \Omega$	$R_S = 30 \Omega$
	$N = 1.05$	$N = 1.08$	$N = 1.05$
	$TT = 1 \cdot 10^{-11} S$	$TT = 1 \cdot 10^{-11} S$	$TT = 1 \cdot 10^{-11} S$
	$C_{J0} = 0.10 pF$	$C_{J0} = 0.18 pF$	$C_{J0} = 1.6 pF$
	$M = 0.35$	$M = 0.5$	$M = 0.35$
	$E_G = 0.69 eV$	$E_G = 0.69 eV$	$E_G = 0.69 eV$
	$XTI = 2$	$XTI = 2$	$XTI = 2$
	$F_C = 0.5$	$F_C = 0.5$	$F_C = 0.5$
	$B_V = 3V$	$B_V = 7V$	$B_V = 7.5V$
	$I_{BV} = 1 \cdot 10^{-5} A$	$I_{BV} = 10 \cdot 10^{-5} A$	$I_{BV} = 1 \cdot 10^{-5} A$
	$V_J = 0.51V$	$V_J = 0.65V$	$V_J = 0.51V$

Рис. 1. SPICE моделі діодів Шоткі

Розглянемо схему діодного сенсора без спеціальних засобів підвищення точності (рис. 2). Зміщення прикладене до вимірювального діода через резистор R2, резистор R4 є опором навантаження і виходом детектора. Другий діод та його коло зміщення має ідентичні до вимірювального характеристики. Для досягнення максимальної ідентичності характеристик на постійному струмі необхідно використовувати діоди з однієї партії виготовлення. Напруга на вимірювальному діоді складається з напруги постійного зміщення U_0 та напруги досліджуваного надвисокочастотного сигналу U_f , напруга на другому діоді містить тільки напругу постійного зміщення U_0 . Обидві напруги подаються на диференційний підсилювач, на виході якого маємо тільки напругу U_f , пропорційну НВЧ сигналу.

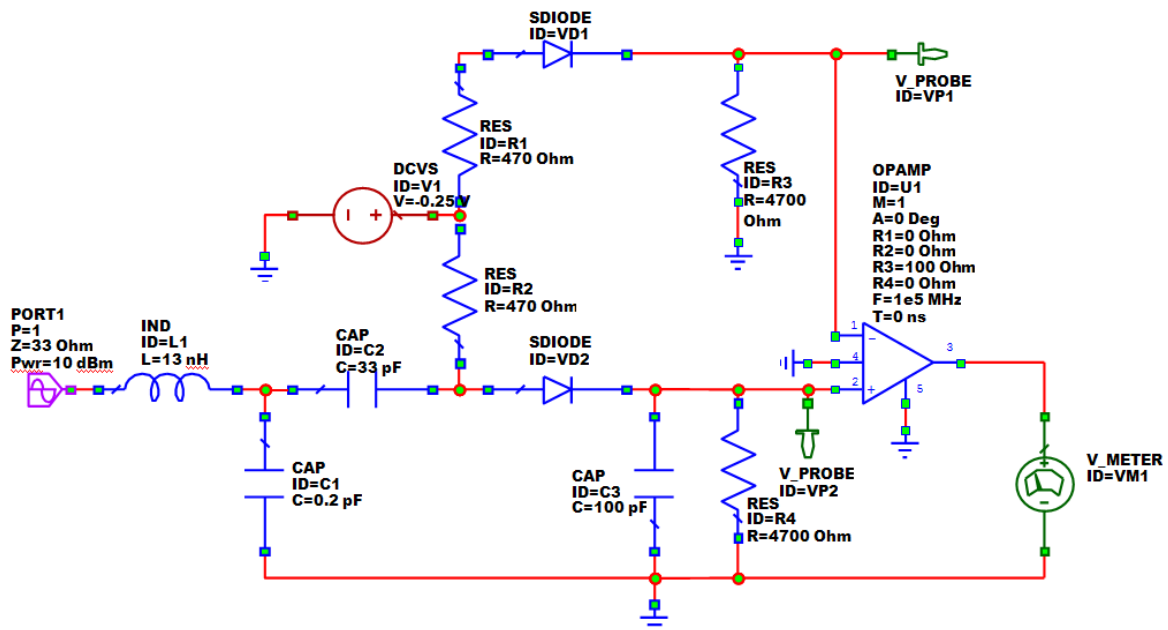


Рис. 2. Принципова схема вимірювального діодного перетворювача

Вхідний опір в досліджуваній схемі прийнятий 33 Ом. Індуктивність L1 та ємність C2 забезпечують реактивне узгодження, резистор R1 забезпечує резистивне узгодження. Чутливість за напругою γ , якщо знехтувати паразитними втратами залежить від чутливості за струмом β наступним чином: $\gamma = \beta \frac{\partial I}{\partial V}$, де I -

струм, V - напруга. Для малих величин струму $I = I_S \left(e^{\frac{V}{0.026}} - 1 \right)$, $\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{I + I_S}{0.026}$, I_S - струм насичення. Теоретична

чутливість за струмом 20 А/Вт, тому $\gamma = \frac{0.52}{I + I_S}$. Цей вираз показує, що чутливість є оберненою функцією від струму насичення. Струм насичення діода, зокрема SMS7621, низький і ідеальна чутливість за напругою $\gamma = \frac{0.52}{4 \cdot 10^{-8}} = 1.3 \cdot 10^7$ є високою, однак вплив параметрів напівпровідникового переходу, опір навантаження та розузгодження значно її зменшує.

Із врахуванням параметрів напівпровідникового переходу діода C_j , R_s , R_j чутливість за напругою $\gamma_1 = \frac{0.52}{I_S (1 + \omega^2 C_j^2 R_s R_j)}$. Для діода SMS7621 $C_j = 0.10$ pF, $R_s = 12$ Ω і $R_j = \frac{0.026}{I_S}$, отже $\gamma = \frac{1}{f^2 + 2 \cdot 10^6 I_S} \frac{V}{W}$ з частотою f в гігагерцах та струмом насичення в амперах, W - потужність сигналу. З врахуванням опору навантаження R_L чутливість детектора за напругою $\gamma_2 = \gamma_1 \frac{R_L}{R_j + R_L} = \frac{\gamma_1}{1 + \frac{R_j}{R_L}}$. Якщо відношення опору

переходу до опору навантаження R_L є малим то $\gamma_1 = \gamma_2$, для детекторів із зовнішнім зміщенням ця умова здебільшого виконується. За відсутності узгодження чутливість за напругою $\gamma_3 = \gamma_2 (1 - \rho^2)$, де ρ - коефіцієнт відбиття діода. Враховуючи опір діода Z_D та опір лінії передачі 33 Ом: $\rho = \frac{Z_D - 33}{Z_D + 33}$. Опір діода залежить також від паразитних параметрів корпусу та частоти.

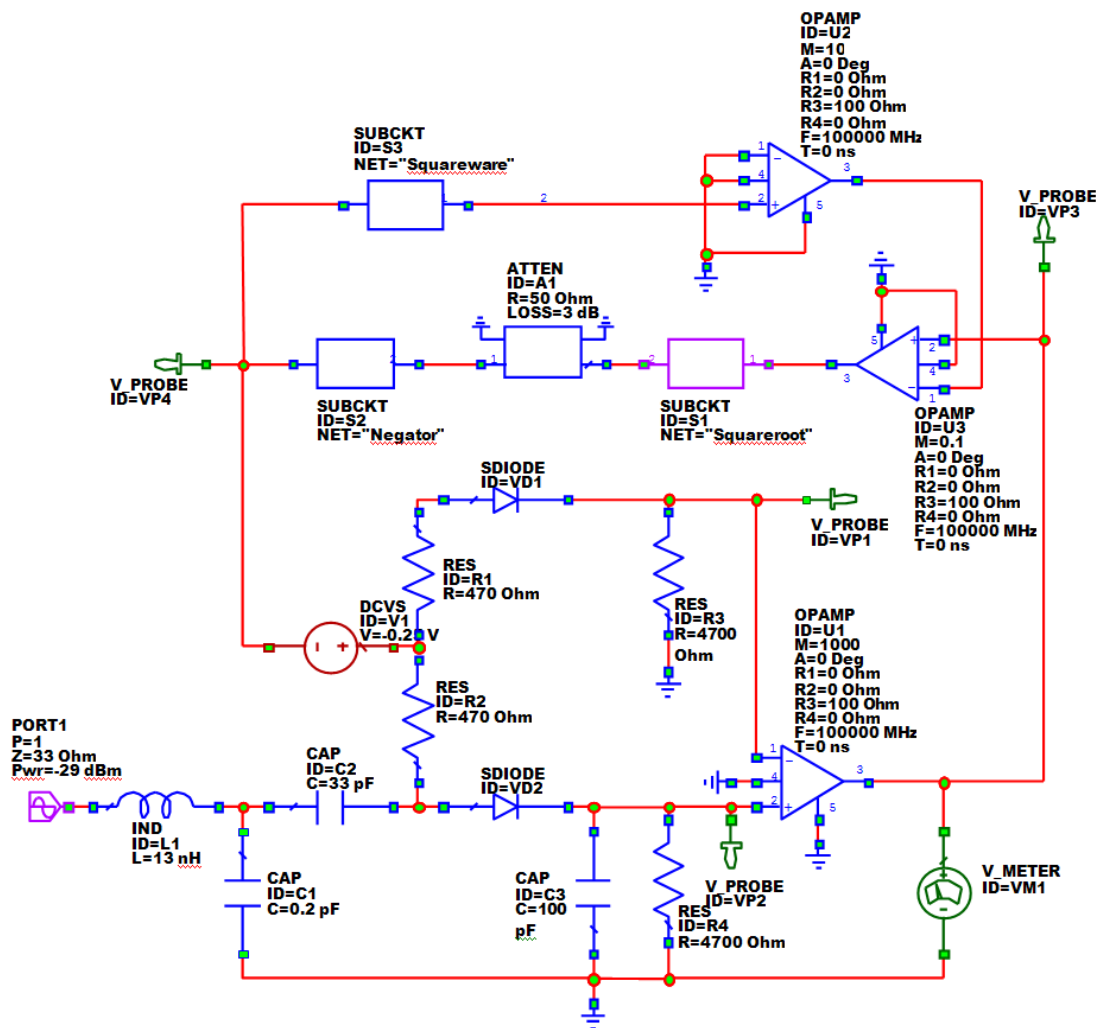


Рис. 3 Принципова схема вдосконаленого вимірювального діодного перетворювача

Розглянемо також схему вдосконаленого ВДП (рис. 3). Сигнал зворотного зв'язку обчислюється у

цифровому вигляді. До схеми детектора додано канал зворотного зв'язку, що складається з коренездобувного перетворювача Net"Squareroot", керованого атенуатора та інвертора Net"Negator". Коефіцієнт перетворення кола зворотного зв'язку знаходиться як добуток коефіцієнтів перетворення коренездобувного перетворювача Net"Squareroot" K_{Sqr} , регульованого атенуатора A1 K_A та інвертора Net"Negator" K_{Ng} :

$K_{33} = K_{Sqr} \cdot K_A \cdot K_{Ng}$. Крім того, додано ще одне коло зворотного зв'язку (33), яке включає обчислювальний блок Net"Squareware", що здійснює операцію квадратування та регульований підсилювач U2. В якості різницевого суматора використано диференційний підсилювач U3. Таким чином, в колі зворотного зв'язку детектора виконується перетворення за допомогою обчислювальних блоків, які виконують операції коренездобування, інвертування та квадратування. Чутливість детектора визначається параметрами симетричного кола зворотного зв'язку: коефіцієнтом передачі квадратора K_{Sqw} та коефіцієнтом підсилення K_{U2}

Досліджено роботу ВДП на частоті 2450 МГц в динамічному діапазоні від 10^{-7} Вт до 10^{-2} Вт (від -40 dBm до 10 dBm). Отримано залежність вихідної напруги від вхідної потужності та залежність чутливості детектора від вхідної потужності (рис 4). Вихідна напруга знімається вольтметром VM1 у вольтах.

Як видно з графіків, детекторний діодний сенсор, якщо не здійснювати заходів з корекції похибки, в такому динамічному діапазоні має нелінійну функцію вимірювального перетворення, чутливість за напругою є функцією від вхідної потужності. Тому такі серійні діодні перетворювачі використовуються в якості детекторів НВЧ електромагнітних полів. Використання такого детектора з метою вимірювання потужності НВЧ без додаткових заходів неможливе.

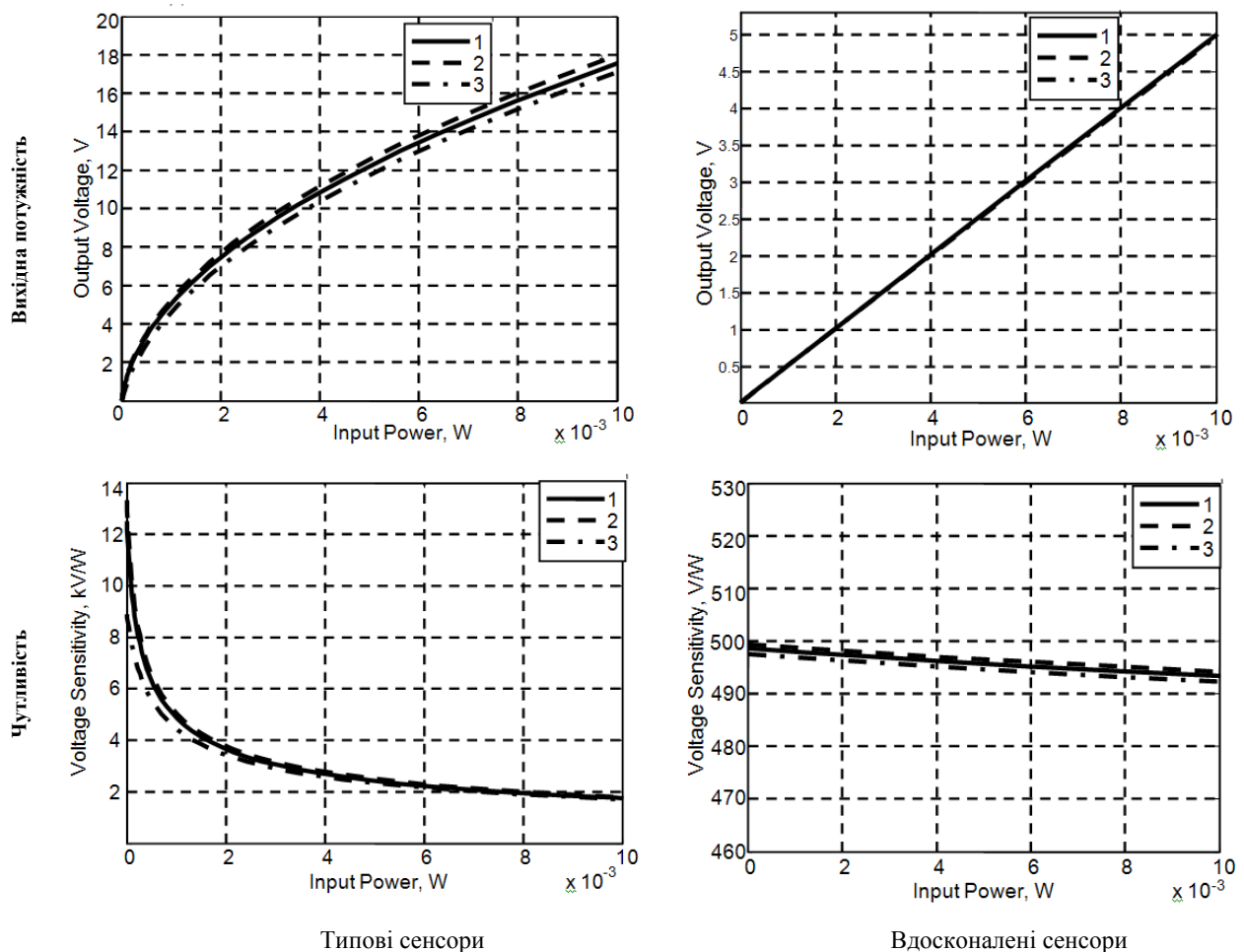


Рис. 4. Залежності вихідної напруги та чутливості детектора від вхідної потужності

Функція вимірювального перетворення вдосконаленого сенсора є лінійною, а чутливість детектора значно менше залежить від вхідної НВЧ потужності практично у всьому діапазоні вимірювання. Чутливістю сенсора можна керувати за допомогою керованого підсилювача у колі симетричного зворотного зв'язку. При цьому зберігається лінійність функції вимірювального перетворення. Отримана чутливість дозволяє використовувати такий сенсор для вимірювання потужності менше 10 мкВт.

Відповідно до теоретичного аналізу використання слабких зворотних зв'язків дозволяє скорелювати адитивну похибку. Вимірювальний перетворювач при переході на високі рівні сигналів працює в режимі сильного параметричного ВЗЗ. Схема такого перетворювача ґрунтується на схемі детекторного перетворювача із параметричним ВЗЗ. Відрізняється тим, що в пряме та зворотне кола ввімкнені параметричні модулятори з коефіцієнтом q , що відповідає зміні коефіцієнта підсилення підсилювача U1 від значення K до значення qK в

колі прямого перетворення та зміні коефіцієнта ослаблення атенюатора А1 від значення β до значення $q\beta$, що здійснено засобами AWR Design Environment. Значення параметричного коефіцієнта q обрано 0,9. Результатом є незначне зниження чутливості та досягнення стабільності чутливості вимірювального перетворювача по напрузі за рахунок корекції не тільки мультиплікативної, а й адитивної похибки. Максимальне відхилення від середнього значення чутливості за напругою складає: для одного діода SMS7621 - 0,837%, для досліджуваної групи діодів - 1,365%.

Аналіз отриманих даних показує, що вимірювальний перетворювач придатний до використання у широкому діапазоні із збереженням стабільної чутливості та має високу лінійність функції вимірювального перетворення.

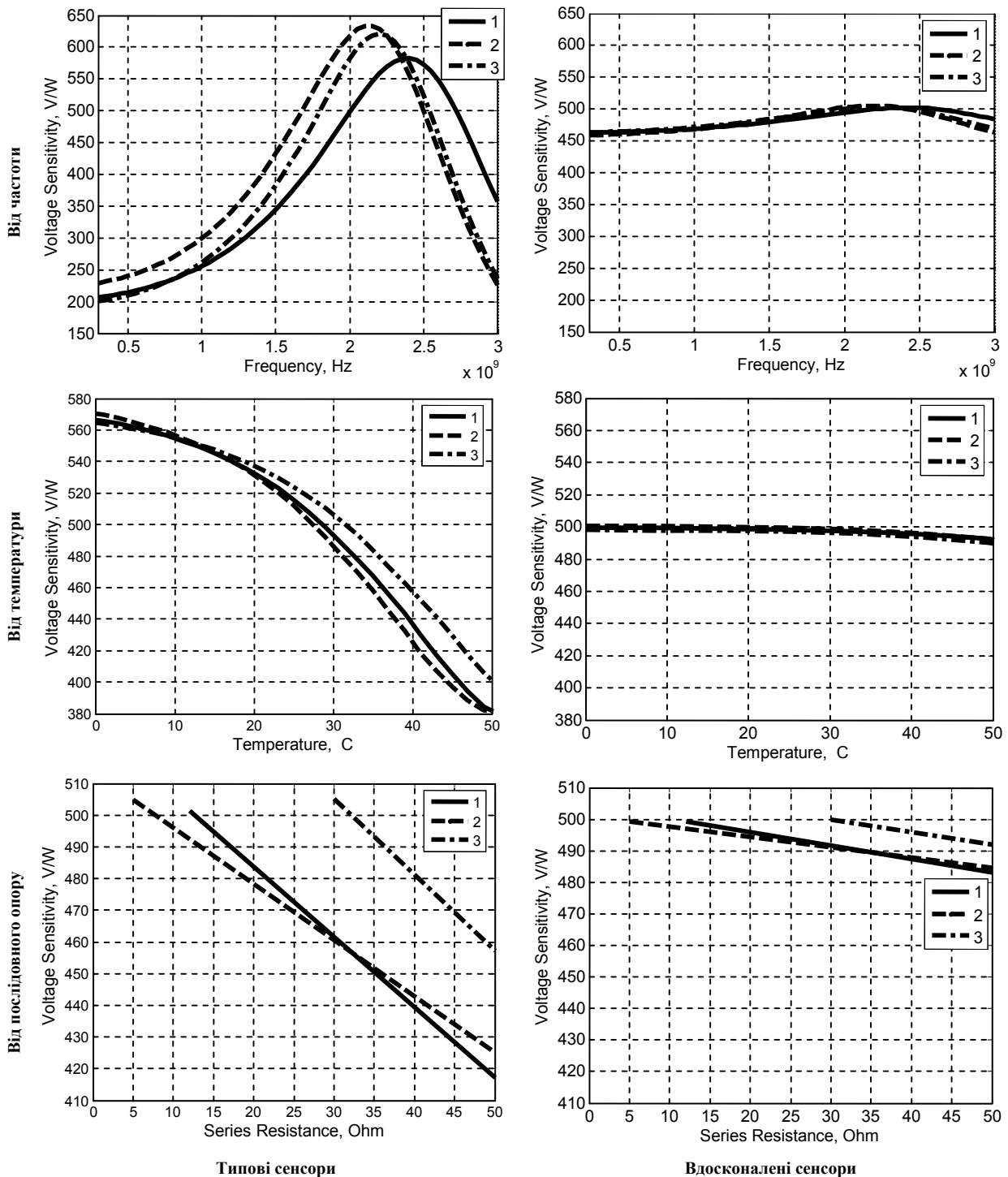


Рис. 5. Залежність чутливості за напругою від дестабілізуючих факторів

Для отримання більш загальної картини досліджено характеристики ВДП за впливу дестабілізуючих факторів (рис. 5). До розгляду прийняті такі дестабілізуючі фактори: частота вхідного сигналу (неінформативний параметр), температура навколишнього середовища (зовнішній дестабілізуючий фактор) та послідовний опір напівпровідникового переходу діода (внутрішній дестабілізуючий фактор).

Залежність чутливості за напругою від частоти вимірюваного НВЧ сигналу досліджено в діапазоні від

0,3ГГц до 3ГГц, відповідно до діапазону частот, в якому працюють НВЧ пристрої. Максимальне відхилення від номінального значення чутливості за напругою для вдосконаленого діодного сенсора складає 7,48%.

Вагомим дестабілізуючим фактором є температура навколишнього середовища. Максимальне відхилення від середнього значення чутливості за напругою вдосконаленого ВДП в діапазоні температур від 0°C до 50°C складає: для одного діода SMS7621 – 1,36%, для досліджуваної групи діодів – 2,053%.

Внаслідок впливу зовнішнього середовища, що спричиняє деградаційні процеси в компонентах та їх старіння, параметри напівпровідникового діода, який є основою вимірювального детекторного перетворювача, змінюють свої значення. В результаті змінюються характеристики самого ВП і втрачається метрологічна надійність. Одним з таких параметрів є послідовний опір напівпровідникового переходу R_s , який з часом та в результаті зовнішніх впливів збільшується. Досліджено залежність роботи діодного сенсора від зміни величини послідовного опору напівпровідникового переходу відповідних діапазонів для кожного діода. Максимальне відхилення від середнього значення для одного ВДП складає 1,974%.

Висновки. Результати проведених досліджень показують, що вимірювальні діодні перетворювачі, в яких використано структурні методи підвищення точності, мають лінеаризовану функцію вимірювального перетворення, а також значно кращі метрологічні характеристики у порівнянні з типовими діодними детекторами. У таких діодних перетворювачах досягнуто певного рівня інваріантності щодо дестабілізуючих факторів різного типу. Це дозволяє використовувати діодні сенсори у вимірювальних каналах інформаційно-вимірювальних систем.

Література

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование/ Цапенко М.П. – [2-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440с.
2. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
3. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка/ Вострокнутов Н.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208с.
4. Пат. 34216 Україна, МПК G 01 R 19/00. Спосіб вимірювального квадратичного перетворення електричних величин/ Водотовка В.І., Моставлюк А.С.; заявник та власник патенту Хмельницький національний університет. – заявл. 30.07.2007; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
5. Моставлюк А.С. Симетрично структуровані НВЧ детектори в системних вимірювачах мікрохвильових параметрів трактів/ Моставлюк А.С.// Вісник Вінницького політехнічного інституту – Вінниця, 2007 – №5 – С20-24.
6. Водотовка В.І. Досягнення метрологічної надійності НВЧ діодного вимірювального перетворювача/ Водотовка В.І., Моставлюк А.С.// Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2007. – №3. – Т.1. – С.153-157.

References

1. Tsapenko M.P. Izmeritelnye informatsionnye sistemy. Struktury i algoritmy, sistemotekhnicheskoe proektirovanie. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 440p. [in Russian]
2. GOST 8.009-84. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Normiruemye metrologicheskie harakteristiki sredstv izmerenij. [in Russian]
3. Vostroknutov N.N. Tsifrovye izmeritelnye ustrojstva. Teorija pogreshnostej, ispitaniya, poverka. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 208p. [in Russian]
4. Pat. 34216 Ukraine, MPK G 01 R 19/00. Sposib vymiriuvalnogo kvadraticnogo peretvorennia elektrichnih velychyn/ Vodotovka V.I., Mostavliuk A.S. – Zajavl. 30.07.2007, opubl. 11.08.2008, Biul. №15. [in Ukrainian]
5. Mostavliuk A.S. Symetrichno strukturovani NVC detector v sistemnih vymiruvachah mikrohviliiovih parametriv traktiv. Visnik Vinnitskogo politehnichnogo institute – Vinnitsa, 2007 - №5 – P.20-24. [in Ukrainian]
6. Vodotovka V.I., Mostavliuk A.S. Dosiagnennia metrologichnoj nadijnosti NVC diodnogo vymiriuvalnogo peretvoriuvacha. Visnik Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Tehnichni nauky. – Khmel'nitsky, 2007. - №3. – T.1. – P.153-157. [in Ukrainian]

Рецензія/Peer review : 15.10.2013 р. Надрукована/Printed :24.11.2013 р.
Рецензент: Шинкарук О.М., д.т.н., проф.