

УДК 004:621.396.6

В.П. Куценко (докт. техн. наук, доц.)

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк
кафедра системного аналізу та моделювання
Державне науково-виробниче підприємство „Кварсит”, м. Костянтинівка
E-mail: donetsk50@mail.ru

ОЦІНКА КОМПЛЕКСНИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ВЕЛИЧИН СПРЯМОВАНОГО ХВИЛЬОВІДНОГО ВІДГАЛУЖУВАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

З врахуванням проведеного математичного моделювання НВЧ-каскаду приладу мікрохвильового контролю з спрямованим хвильовідним відгалужувачем (СХВ) виконані комп'ютерні розрахунки оцінки комплексних узагальнених величин (КУВ) СХВ з використанням нечіткої логіки при відхиленні від оптимальних значень параметрів довжини хвилі сигналу, всіх фаз і модулів комплексних коефіцієнтів відбиття антени і еквівалента антени, а також фаз і модулів елементів матриці розсіювання СХВ. Розраховані й побудовані графіки.

Ключові слова: *прилад мікрохвильового контролю, спрямований хвильовідний відгалужувач, моделювання, спектральна щільність потужності, оптимальні параметри, комплексні величини.*

Вступ

При розробці схем високочутливих мікрохвильових приладів контролю параметрів діелектричних матеріалів і виробів у їх вхідної частини використовують СХВ, які можуть обмежувати смугу прийнятих частот широкосмугових сигналів, що знижує чутливість апаратури і точність дослідження. У роботах [1-7] розвинені наукові основи мікрохвильового неруйнівного контролю в частині перетворення низькоінтенсивних шумових сигналів з періодичним порівнянням на вході приладу. Без спрощень побудовані математичні моделі і проведено теоретичне дослідження СХВ з урахуванням власних радіотеплових шумів НВЧ-кіл.

Оцінка оптимальних значень комплексних параметрів елементів, підключених на вході приладу контролю [8-10] і введених додатково при розрахунках нормованих відбитих хвиль КУВ, розрахована на основі узагальненої моделі багатополусного НВЧ-перетворювача і дозволяє істотно поліпшити його метрологічні характеристики і розрахувати похибки при радіометричному контролі.

Постановка задачі дослідження

Для подальшого розвитку теорії побудови засобів мікрохвильового контролю діелектричних матеріалів і виробів на їх основі актуальними є дослідження, з використанням нечіткої логіки, на основі проведених розрахунків оптимальних параметрів СХВ [7], [8] і залежностей введених в процесі моделювання його КУВ від режимів роботи НВЧ-кіл.

Основна частина

На основі проведеного раніше математичного моделювання вхідної частини радіометричного приладу контролю з спрямованим хвильовідним відгалужувачем [2], [3], [7] виконаємо з використанням нечіткої логіки комп'ютерні розрахунки введених його КУВ, при відхиленні параметрів НВЧ-кіл у межах $\pm 10\%$ від оптимальних значень.

Розрахунки оптимальних параметрів СХВ і з'єднаних з ним НВЧ-елементів вхідної частини функціональної схеми радіометричного приладу контролю в умовах низькоінтенсивних сигналів наведені в таблиці 1. На підставі результатів оптимізації СХВ (таблиця 1) проведемо за допомогою програми Mathcad 15 розрахункову оцінку стабільності

КУВ СХВ при відхиленні параметрів НВЧ-кіл від оптимальних значень.

Таблиця 1

Оптимальні параметри СХВ в умовах низькоінтенсивних сигналів

φ_{12}	S_{12}	S_{13}	φ_{13}	S_{14}	φ_{14}	S_{23}	φ_{23}	φ_{24}	S_{24}
0,25	0,818	0,285	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,25	0,285
φ_{34}	S_{34}	Γ_A	φ_A	φ_1	Γ_{Rn}	φ_{Rn}	Γ_4	φ_4	λ
0,25	0,818	0,415	0,5	0,25	0,125	0,25	0,508	0,25	7,352

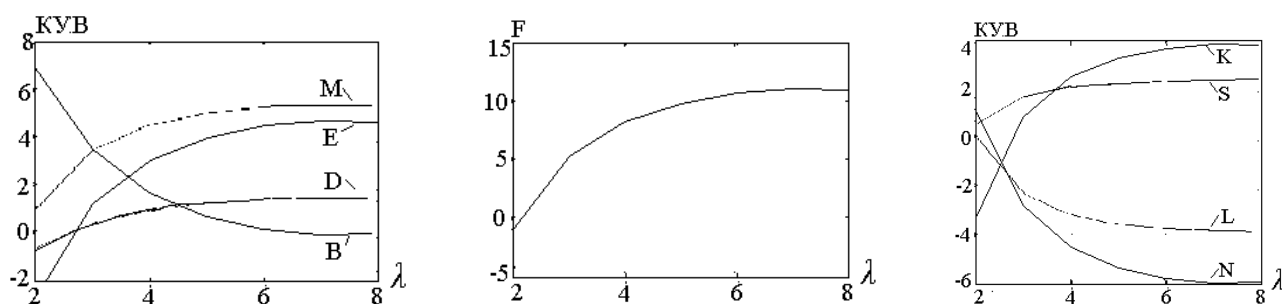
При оптимальних значеннях параметрів НВЧ-кіл отримані наступні значення КУВ:
 $A = 1,928 - j0,027$, $B = 0,237 - j0,237$, $C = 9,237 + j0,237$, $D = 3,908 - j2,47$,
 $E = 4,883 - j6,019$, $F = 11,025 - j12,649$, $K = 3,976 - j4,989$, $L = -3,78 + j1,48$,
 $M = 5,289 - j2,664$, $N = -5,976 + j4,428$, $G = -0,298 - j0,24$, $S = 2,21 - j1,356$.

Для аналізу стабільності залежностей значень КУВ при відхиленні параметрів НВЧ-кіл приладу мікрохвильового контролю від оптимальних значень хвильового діапазону (λ), всіх фаз (φ) комплексних коефіцієнтів відбиття (ККВ) і модуля ККВ (Γ_A), всіх фаз елементів матриці розсіювання СХВ (φ_S) і модуля елемента матриці розсіювання (S_{14}) розраховано таблиці і побудовано графіки. Нижче приводяться тільки найбільш характерні залежності модулів КУВ від величин, що змінюються, параметрів НВЧ-кіл щодо їх оптимальних значень. Залежність значень КУВ від довжини хвилі сигналу λ наведено в табл. 2 і графіках (рис. 1).

Таблиця 2

Залежність КУВ СХВ від довжини хвилі сигналу

λ (мм)	2	3	4	5	6	7	8
B	6.891	3.421	1.599	0.616	0.082	-0.154	-0.101
D	-0.641	2.406	3.201	3.601	3.811	3.901	3.881
E	-2.627	1.399	3.235	4.166	4.654	4.866	4.819
F	-0.975	5.215	8.209	9.782	10.625	10.996	10.913
K	-3.105	1.021	2.666	3.429	3.807	3.964	3.929
L	0.017	-2.295	-3.152	-3.527	-3.704	-3.775	-3.759
M	0.8	3.351	4.411	4.918	5.173	5.281	5.257
N	1.037	-2.843	-4.526	-5.354	-5.78	-5.962	-5.921
S	0.29	1.513	1.933	2.104	2.179	2.208	2.202

Рисунок 1 - Графіки залежності КУВ СХВ від довжини хвилі сигналу λ (мм)

Аналіз дозволив оцінити стабільність КУВ СХВ в хвильовому діапазоні від 2 до 8 мм, яка носить нелінійний характер. Значення модулів КУВ змінюються в 5-7 разів, а фазові складові в 1,5-2 рази.

Результати розрахунків значень КУВ СХВ приладу мікрохвильового контролю, що одержані при зміні всіх фаз коефіцієнтів відбиття приймальної антени φ_A , еквівалента антени

φ_R , входів модулятора φ_1 і змішувача φ_4 у межах $\pm 10\%$ від їх оптимальних значень із кроком 2% наведені в таблиці 3, а їх графічні залежності на рис. 2.

Таблиця 3

Залежність КУВ СХВ від зміни фаз коефіцієнтів відбиття НВЧ-елементів

$\varphi(\%)$	-10	-8	6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
B	-0.58	-0.5	-0.42	-0.34	-0.26	-0.17	-0.09	-0,01	0.077	0.162	0.247
E	5.241	5.171	5.1	5.029	4.956	4.883	4.809	4.734	4.658	4.582	4.505
F	11.66	11.53	11.41	11.28	11.15	11.03	10.895	10.76	10.63	10.5	10.37
K	4.233	4.184	4.134	4.082	4.03	3.976	3.922	3.866	3.81	3.752	3.693
M	5.467	5.467	5.398	5.362	5.326	5.289	5.252	5.214	5.175	5.136	5.096
N	-6.28	-6.22	-6.16	-6.1	-6.04	-5.98	-5.91	-5.85	-5.78	-5.72	-5.65

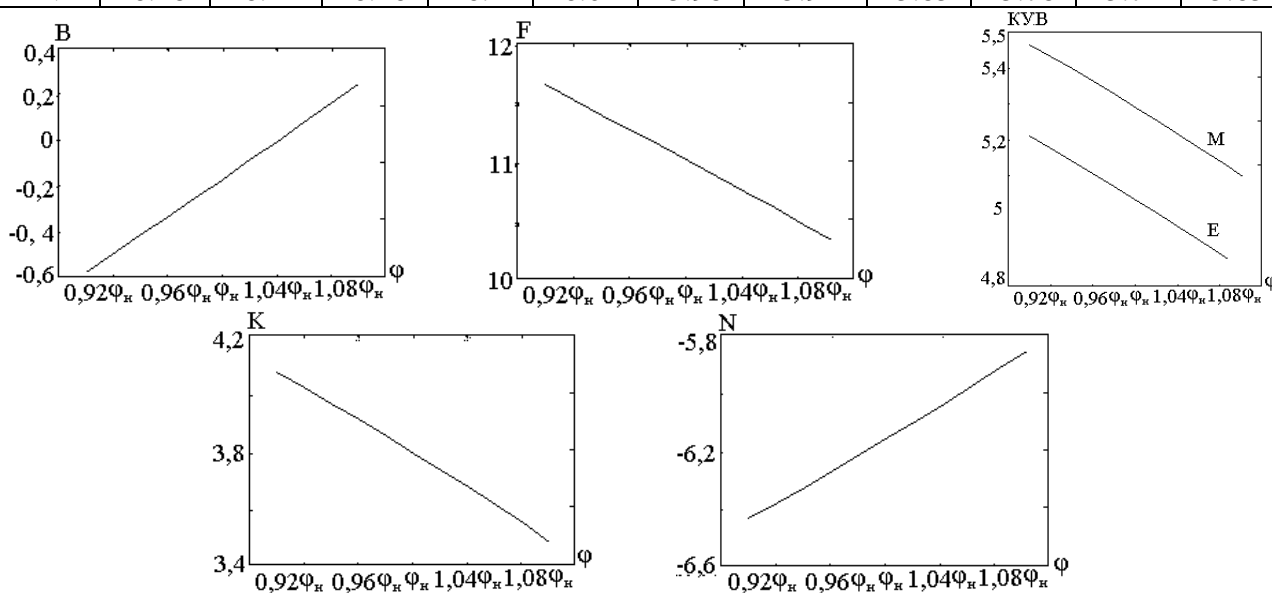


Рисунок 2 - Графіки залежності КУВ СХВ від фаз коефіцієнтів відбиття приймальної антени φ_A , еквівалента антени φ_R , входів модулятора φ_1 і змішувача φ_4

З розрахунків слідує, що зміна фазових складових коефіцієнтів відбиття НВЧ-кіл викликає зміну значень модулів КУВ у діапазоні досліджень в межах 11-23% і зміну фазових складових в межах 6-30%.

Проведені розрахунки значень КУВ, що одержані при зміні всіх фаз φ_S елементів матриці розсіювання СХВ у межах $\pm 10\%$ від оптимальних значень із кроком 2%, наведені в таблиці 4 і рис. 3. Зміна фазових складових елементів матриці розсіювання СХВ викликає лінійну зміну значень модулів КУВ в межах від 5% до 5 разів при відхиленні фазових складових КУВ до 16%.

Таблиця 4

Залежність КУВ при зміні фаз елементів матриці розсіювання СХВ

$\varphi_S(\%)$	-10	-8	6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
B	-0.42	-0.37	-0.32	-0.27	-0.22	-0.17	-0.12	-0.07	-0.02	0.027	0.077
D	3.98	3.97	3.95	3.94	3.92	3.91	3.89	3.88	3.863	3.848	3.832
E	5.06	5.01	4.98	4.94	4.9	4.88	4.85	4.82	4.79	4.76	4.73
F	11.66	11.53	11.41	11.28	11.15	11.03	10.9	10.76	10.63	10.5	10.37
K	4.08	4.06	4.04	4.02	3.998	3.98	3.95-	3.93	3.91	3.89	3.86
N	-6.12	-6.09	-6.06	-6.04	-6.01	-5.98	-5.95	-5.92	-5.89	-5.85	-5.82

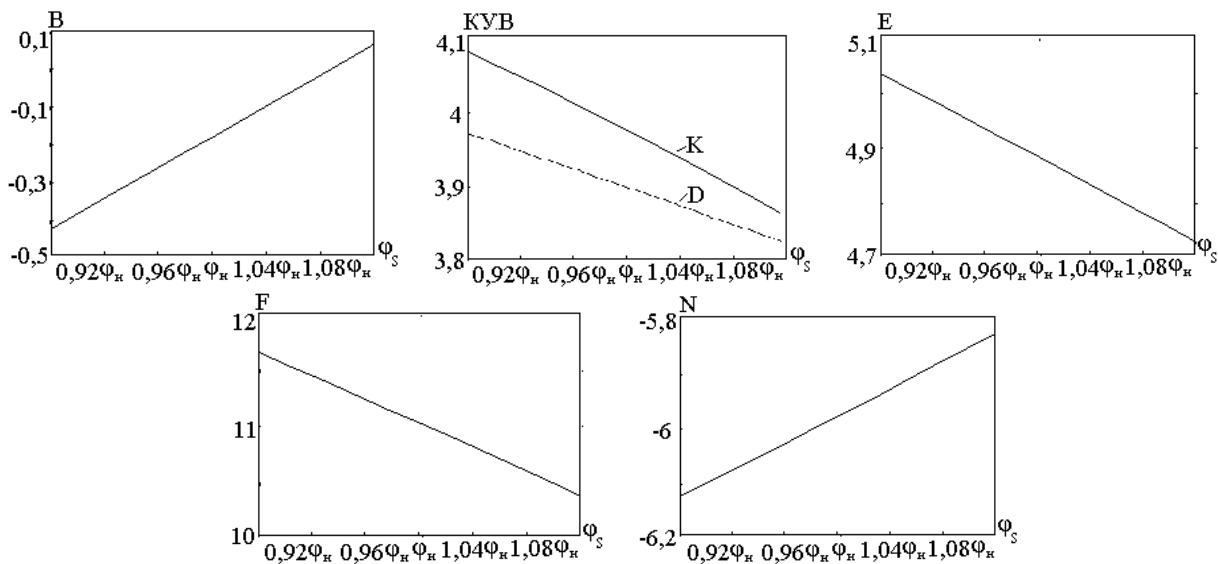


Рисунок 3 - Графіки залежності КУВ при зміні всіх фаз φ_s елементів матриці розсіювання СХВ

Результати розрахунків значень КУВ СХВ, одержувані при зміні модуля елемента матриці розсіювання S_{14} у межах $\pm 10\%$ від оптимальних значень із кроком 2% наведені в таблиці 5 і рис. 4.

Таблиця 5

Залежність КУВ СХВ від зміни модуля елемента матриці розсіювання S_{14}

S_{14}	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55
D	4.26	4.185	4.112	4.041	3.974	3.908	3.845	3.784	3.725	3.668	3.612
E	5.369	5.264	5.163	5.066	4.973	4.883	4.796	4.712	4.631	4.553	4.477
F	11.96	11.76	11.57	11.38	11.199	11.03	10.86	10.69	10.54	10.38	10.237
K	3.655	3.717	3.78	3.845	3.91	3.976	4.044	4.113	4.182	4.253	4.325
L	-3.56	-3.61	-3.65	-3.69	-3.74	-3.78	-3.83	-3.87	-3.92	-3.96	-4.008
N	-5.59	-5.67	-5.74	-5.82	-5.896	-5.98	-6.06	-6.14	-6.22	-6.31	-6.391

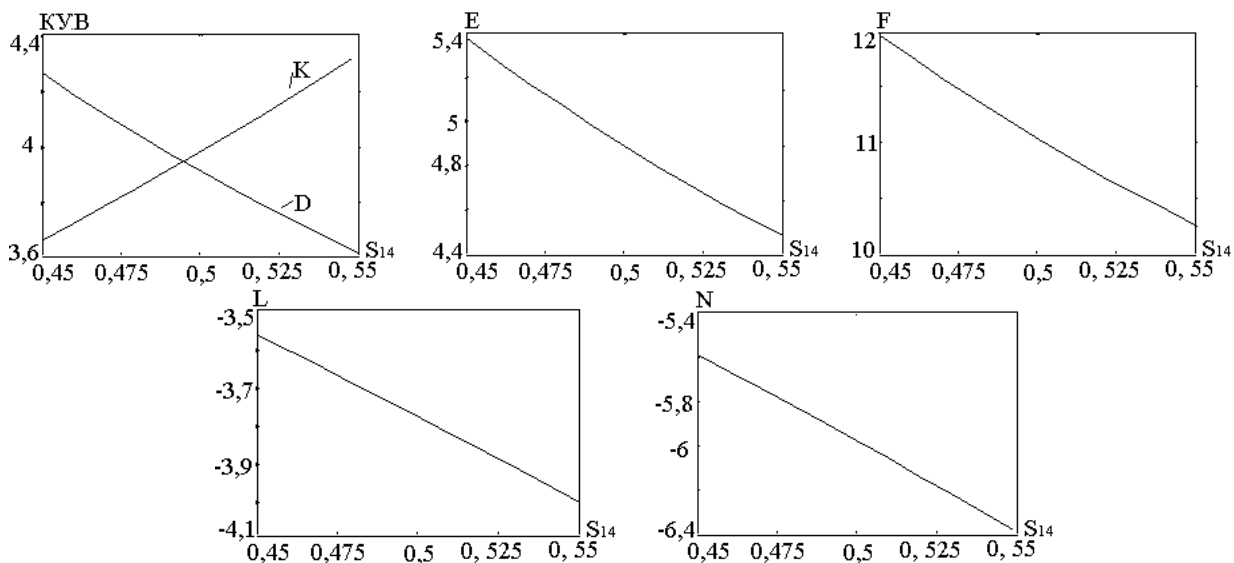


Рисунок 4 - Графіки залежності КУВ СХВ від зміни модуля елемента матриці розсіювання S_{14}

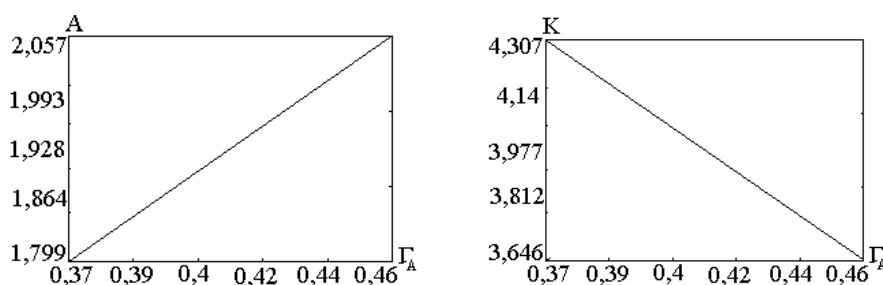
Зміна модуля елемента матриці розсіювання S_{14} у межах аналізу впливає на значення модуля КУВ в межах до 22% і фазової компоненти КУВ в межах від 13 до 22%.

Результати розрахунків значень КУВ, що отримані при зміні модуля коефіцієнта відбиття антени Γ_A у межах $\pm 10\%$ із кроком 2% наведені в таблиці 6 і рис. 5.

Таблиця 6

Залежність КУВ ПХТ від зміни модуля коефіцієнта відбиття антени Γ_A

Γ_A	0.373	0.382	0.39	0.398	0.407	0.415	0.423	0.432	0.44	0.448	0.456
A	1.799	1.824	1.85	1.876	1.902	1.928	1.954	1.98	2.006	2.031	2.057
K	4.307	4.241	4.175	4.109	4.043	3.976	3.91	3.844	3.778	3.712	3.646

Рисунок 5 - Графіки залежності КУВ ПХТ від зміни модуля коефіцієнта відбиття антени Γ_A

Аналіз наведених розрахунків свідчить про те, що зміна модуля коефіцієнта відбиття антени Γ_A викликає зміну значень модулів КУВ СХВ у діапазоні досліджень в межах від 14 до 18% і зміну фазових складових в межах 1,5%.

Висновки

1. Встановлено, що комплексні узагальнені величини чутливі в різному ступені до відхилення ($\pm 10\%$) від оптимальних параметрів (модулі і фазові складові) НВЧ-кіл приладів контролю і змінюються від декількох сотих відсотка до 90%.

2. Розрахована залежність КУВ СХВ приладів контролю від довжини хвилі, яка носить нелінійний характер, значення модулів змінюються в 5-7 разів, а фазові складові в 1,5-2 рази. Зміна фазових складових ККВ НВЧ-кіл викликає зміну значень модулів КУВ у діапазоні досліджень в межах 11-23% і зміну фазових складових в межах 6-30%, а зміна фазових складових елементів матриці розсіювання СХВ викликає лінійну зміну значень модулів КУВ в межах від 5% до 5 разів при відхиленні фазових складових КУВ до 16%.

3. Проведені розрахунки значень КУВ СХВ з використанням нечіткої логіки, одержані при зміні всіх фаз ККВ приймальної антени, еквівалента антени, входів змішувача і модулятора у межах $\pm 10\%$ від оптимальних значень, ілюструють практичну їх нечутливість до цих змін і коливаються від 0,011 до 1,224%. Зміна модуля ККВ Γ_A показує максимальне відхилення КУВ до 3,297% від оптимальних значень. Більші відхилення значень КУВ від оптимальних величин, спостерігаються при зміні модуля елемента матриці розсіювання S_{14} СХВ ніж при зміні всіх фаз елементів цієї матриці, які, відповідно, досягають максимальних значень 6,848% і 1,092%.

4. Показано, що результати розрахунків з використанням нечіткої логіки дозволяють збільшити швидкість розробки нових НВЧ-пристроїв, прогнозувати і забезпечувати підвищення точності їх роботи і, відповідно, достовірності контролю властивостей діелектричних матеріалів і виробів на їх основі.

Список використаної літератури

1. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии /Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф./ – Донецк : ІПШ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
2. Куценко В.П. Радиометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів /Куценко В.П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф., Шевченко К.Л., Яненко О.П./ – Донецьк : ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.
3. Куценко В.П. Періодичне порівняння сигналів в НВЧ-радіометрії /Куценко В.П./ – Донецьк : ІПШ «Наука і освіта», 2012. – 300 с.
4. Куценко В.П. Теоретичні основи вимірювання низькоінтенсивних шумових сигналів з періодичним порівнянням на вході радіометричної системи / Куценко В.П // Науково-теоретичний журнал „Штучний інтелект” – Вип. 3/2011. – Донецьк. Інститут проблем штучного інтелекту МОН і НАН України, 2011. – С. 456–462.
5. Куценко В.П., Яненко О.П. Оцінка похибок перетворення низькоінтенсивних шумових сигналів при періодичному порівнянні в НВЧ-колах РПК // Вісник Національного технічного університету України „КПІ”. – Серія „Приладобудування”. – Вип. 45/2013. – Київ. НТУУ „КПІ”, 2013. – С.77–82.
6. Куценко В.П. Аналіз залежності відхилення узагальнених комплексних величин НВЧ-вузлів від нормованих значень / В.П. Куценко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, №3, 2013. – С.118-123.
7. Куценко В. П. Математична модель направленої хвилевідної відгалужувача в умовах низькоінтенсивних сигналів / Куценко В.П // Вісник Житомирського державного технічного університету - Серія "Технічні науки". - Вип. 2 (53)/2010. - Житомир. ЖДТУ, 2010. - С. 118-123.
8. Куценко В.П. Розрахунки оптимальних параметрів спрямованого хвилевідного відгалужувача і похибок перетворення низькоінтенсивних НВЧ-сигналів /Куценко В.П., Сергиєнко С.П.// Науково-теоретичний журнал „Штучний інтелект” – Вип. 1/2013. – Донецьк. Інститут проблем штучного інтелекту МОН і НАН України, 2013. – С.163–181.
9. Куценко В.П. Оптимізація параметрів вхідних вузлів НВЧ-радарних систем в умовах низькоінтенсивних сигналів /Куценко В.П., Сергиєнко С.П., Трегубов М.Ф., Сидоренко В.А.// Науково-теоретичний журнал „Штучний інтелект” – Вип. 4/2012. – Донецьк. Інститут проблем штучного інтелекту МОН і НАН України, 2012. – С.489–498.
10. Куценко В.П. Аналіз підходів до розрахунків вхідних елементів НВЧ-радіометрів, як основних джерел похибок вимірювання низькоінтенсивних сигналів /В.П. Куценко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Вип. 20 (182). – Донецьк : ДонНТУ, 2012. – С. 199-205.

References

1. Kutsenko, W.P., Skripnik, Yr.A., Tregubov, N.F., Shevchenko, K.L. and Yanenko, A.F. (2011), *Metodu i sredstva sverchvusokochastotnoi radiometrii* [Methods and facilities of super-high-frequency radiometry], IPAI «Science and education», Donetsk, UA.
2. Kutsenko, W.P., Skripnik, Yr.A., Tregubov, N.F., Shevchenko, K.L. and Yanenko, A.F. (2012), *Radiometrichnij SVCh-kontrol vlastivostei materialiv* [Aerophare OHF-control of properties of materials], IPAI «Science and education», Donetsk, UA.
3. Kutsenko, W.P. (2012), *Perioduchne porivnyunny sygnaliv v NVCh-radiometrii* [Periodic comparison of signals in OHF-radiometry], IPAI «Science and education», Donetsk, UA.
4. Kutsenko, W.P.(2011), “Theoretical bases of measuring low of intensive noise signals are with periodic comparison on the entrance of the aerophare system”, *Teoretychni osnovu vumirjvanny nizkointensivnych chymovuch signalov z perioduchnum porivnjnjm na vchodi radiometrichnoi sistemy*, vol. 3, Theoretical magazine “Artificial intelligence”, pp. 456–462.

5. Kutsenko, W.P. and Yanenko, A.F. (2013), "Estimate of errors of transformation of низькоінтенсивних of noise signals at periodic comparison in OHF circles of aerophare devices of control", *Ozinka pochibok peretvorennj nizkointensivnuch chymovuch signalov pri periodichnomy porivnjnni v NVCh-kolach RPK*, vol. 45, Announcer of the National technical university of Ukraine "KPI". are Series of "Instrument-making", pp. 77–82.
6. Kutsenko, W.P. (2013), "An analysis of dependence of rejection of the generalized complex sizes of OHF of knots is from the rationed values", *Analiz zalegnosti vidchilennj uzagalnenuch kompleksnuch velechin NVCh-vyzliv vid normovanuch znachen*, vol. 3, Announcer of the Kyiv national university of technologies and design, pp. 118-123.
7. Kutsenko, W.P. (2010) "A mathematical model of directed хвилевідного відгалужувача is in the conditions of low intensive signals", *Matematychna model napravlenogo chvilevidnogo vidgalygyvacha v umovach nizkointensivnuch signalov*, vol. 2 (53), An announcer of Zhytomyr state technical university is Series "Engineering sciences", pp. 118-123.
8. Kutsenko, W.P. and Sergienko, S.P. (2013), "Calculations of optimal parameters of the directed waveguide coupler and errors of transformation low intensive OHF-signals", *Rozrachunki optimalnuch parametriv sprjmovanogo chvilevidnogo vidgalygyvacha I pochibok peretvorennj nizkointensivnuch NZVCh-signalov*, vol. 1, Theoretical magazine "Artificial intelligence", pp. 163-181.
9. Kutsenko, W.P., Sergienko, S.P., Tregubov, N.F. and Sidorenko, W.A. (2012), "Optimization of parameters of entrance knots of OHF-radar systems is in the conditions of low intensive signals", vol. 4, *Optimizacij parametriv vchidnuch vyzliv NZVCh-radarnuch system v umovach nizkointensivnuch signalov*, Theoretical magazine "Artificial intelligence", pp. 489-498.
10. Kutsenko, W.P. (2012), "Analysis of going near the calculations of entrance elements of OHF-radiometers, as basic sources of errors of measuring low of intensive signals", *Analiz pidchodiv do rozrachunkiv vchidnuch elementiv NZVCh-radiometriv, jk osnovnych dgerel pochibok vumirjvanny nizkointensivnuch signalov*, vol. 20 (182), Scientific works of the Donetsk national technical university. are Series the "Computing engineering and automation", pp. 199-205.

Надійшла до редакції:
18.03.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

В.П. Куценко

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Оценка комплексных обобщенных величин направленного волноводного ответвителя с использованием нечеткой логики. С учетом проведенного математического моделирования СВЧ-каскада прибора микроволнового контроля с направленным волноводным ответвителем (НВО) выполнены компьютерные расчеты оценки комплексных обобщенных величин НВО с использованием нечеткой логики при отклонении от оптимальных значений параметров длины волны сигнала, всех фаз и модулей комплексных коэффициентов отражения антенны и эквивалента антенны, а также фаз и модулей элементов матрицы рассеивания НВО. Рассчитаны и построены графики.

Ключевые слова: прибор микроволнового контроля, направленный волноводный ответвитель, моделирование, спектральная плотность мощности, оптимальные параметры, комплексные величины.

V.P. Kutsenko

Donetsk National Technical University

Estimation of the complex generalized sizes of the directed waveguide coupler with the use of fuzzy logic. At development of charts of highly sensitive microwave devices of control of parameters of dielectric materials and wares in their entrance part use the directed waveguide couplers (DWC) that can limit the

stripe of the accepted frequencies of broadband signals, that reduces the sensitiveness of apparatus and research exactness. Before in works scientific bases of microwave non-destructive control were developed in part of transformation low of intensive noise signals with periodic comparison on the entrance of device. Without simplifications mathematical models are built and a theoretical study of the directed waveguide coupler is undertaken taking into account own radiothermal noises over high-frequency chains. The estimation of optimal values of complex parameters of the elements connected on the entrance of control device and entered additionally at the calculations of the rationed reflected waves of the complex generalized sizes (CGS) is expected on the basis of the generalized model multipolar over a high-frequency (OHF) transformer and allows substantially to improve his metrology descriptions and expect errors at aerophare control. In a robot the task of further development of theory of construction of facilities of microwave control of dielectric materials and wares is decided in part of research on the basis of the conducted calculations of optimal parameters of DWC and dependences entered in the process of design of it CGS from the modes of operations of OHF of chains. Taking into account the conducted mathematical design of OHF of chains of device of microwave control with the directed waveguide coupler the computer calculations of estimation of stability of the complex generalized sizes of DWC are executed at deviation from the optimal values of parameters of wave-length of signal, all phases and modules of complex reflectivities of aerial and equivalent of aerial, and also phases and modules of elements of matrix of dispersion of DWC. Charts are expected and built. It is shown that the results of calculations allow to increase speed of development of the new OHF devices, forecast and provide the increase of exactness of their work and, accordingly, to authenticity of control of properties of dielectric materials and wares on their basis.

Keywords: device of microwave control, directed waveguide coupler, design, spectral closeness of power, optimal parameters, complex sizes.



Куценко Владимир Петрович, Украина, закончил Таганрогский радиотехнический институт, Заслуженный работник промышленности Украины, докт. техн. наук, с.н.с., доцент кафедры системного анализа и моделирования ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина), с.н.с.-консультант Государственного научно-производственного предприятия «Кварсит» (ул. Шмидта, 20, г. Константиновка, Донецкой обл., 85104, Украина). Основное направление научной деятельности – измерение низкоинтенсивных СВЧ-сигналов, радиометрические исследования состава и свойств объектов, метрология измерения случайных сигналов.