

- дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Пробл. прочности. - 2002. - №4. - С. 119-125.
2. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Сорока Е.Б., Липинская Н.В. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях // Пробл. прочности. - 2001. - №4. - С. 62-67.
 3. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Под ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перероб. и доп. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
 4. Кузнецов В.Н. Поле упругих напряжений в плоской контактной задаче // Проблемы прочности. –1971. - № 2. -С. 100-105.
 5. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 2. Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. –М.: Машиностроение, 1968. -464 с., ил.
 6. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

<p>Антонюк В.С., Сорока О.Б., Калиниченко В.І. Анализ напряженно-деформированного состояния режущего инструмента с покрытиями В работе рассмотрено напряженно-деформированное состояние режущего инструмента с покрытием сплошной и дискретной структуры в условиях воздействия контактного и касательного нагружения. Приведены результаты числовых расчетов позволяют сделать вывод о том, что при наличии дискретного покрытия материал основы подлежит более локальному нагружению сжатием под покрытием и является разгруженным за дискретными участками покрытия</p>	<p>Antoniuk V.S., Soroka O.B., Kalinichenko V.I. Analyses of the stress-strain state of cutting tools with continues The stress-strain state of cutting tools with continues and discontinues coatings is observed. The results allow to conclude that the material of cutting tool with discontinues coatings is much more unloaded between the areas without coatings and that compressive stresses are more local under discontinues areas than under continues ones.</p>
---	---

*Надійшла до редакції
21 травня 2004 року*

УДК 623.316.728.001

ДЕТЕКТОРНИЙ ВАТМЕТР ПОГЛИНЕНОЇ НВЧ ПОТУЖНОСТІ

Водотовка В.І., Данілевська В.Г., Рєпа Ф.М., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м.Київ, Україна

Запропоновано автоматичний вимірювач – ватметр поглиненої потужності для радіотехнічної системи НВЧ технологічного призначення. Проведений аналіз його статичного та динамічного стану. Визначено параметри, при яких досягається стійка робота ватметра

Вступ

Нагрівання вологого матеріалу в мікрохвильовому електромагнітному полі (ЕМП) супроводжується зміною його макродіелектричних властивостей [1]. Природним наслідком цього процесу є зміни коефіцієнта відбиття та величини поглиненої матеріалом потужності надвисоких частот (НВЧ), що призводить до

неконтрольованого теплофізичного стану об'єкта, який знаходиться в робочій зоні технологічної обробки. Це не може не позначитися на стабільності і багаторазовій відтворюваності технологічного процесу.

Відоме технічне рішення [2] частково розв'язує проблему досягнення інваріантності теплофізичного стану об'єкта в мікрохвильовому полі, але застосування в колі зворотного зв'язку диференційних підсилювачів обумовлює нескомпенсовану похибку.

Крім того, необхідно враховувати особливості мікрохвильової обробки деяких матеріалів. Так, пластмасові, порцелянові та керамічні вироби складної форми, які застосовують на практиці на стадіях в'ялення, сушіння та гартування заготовельних форм, щоб уникнути термомеханічних пошкоджень, потребують повільного збільшення поглиненої НВЧ потужності та повільного зменшення відповідно на початку та наприкінці нагрівання. Тобто потрібно стабілізувати поглинену НВЧ потужність на різних рівнях в залежності від технологічних потреб, а подібні технологічні вимоги можуть бути задоволені лише за допомогою точного вимірювача та регулятора поглиненої НВЧ потужності.

1. Метод регулювання середньої поглиненої НВЧ потужності

Відомо що імпульсні магнетрони, в тому числі технологічного призначення, наприклад, типу М-105, повинні працювати при постійній анодній нарузі, що зазначена в його паспорті [3]. Кращим, на відміну від число-імпульсного методу регулювання, що застосовується в побутових мікрохвильових печах [4], є метод регулювання середньої потужності магнетрона \bar{W} зміною частоти F високовольтних анодних імпульсів, які формуються модулятором, відповідно до залежності

$$\bar{W} = W_{\text{имп}} \tau F,$$

де $W_{\text{имп}}$ – НВЧ потужність в імпульсі, тривалістю τ .

На рис.1 наведено структурну схему ватметра в складі автоматичного регулятора НВЧ потужності, що поглинається в робочій камері технологічної лінії (ТК) радіотехнічної системи. Регулятор є замкненою системою керування поглиненою потужністю з сильним зворотним зв'язком.

Вихідна координата регулятора – середня поглинена потужність $\bar{W}_{\text{пор}}$ вимірюється ватметром PW . Його вихідний сигнал у вигляді напруги постійного струму $U_{\text{вих}}$ надходить у коло зворотного зв'язку, де в β разів зменшується точним подільником напруги RP і далі порівнюється з сигналом керування $U_{\text{к}}$ диференційним підсилювачем $A1$ та ним же підсилюється різницевий сигнал $U_{\text{р}} = U_{\text{к}} - U_{\text{вих}} \cdot \beta$ в K_1 разів і далі підсилювачем $A2$ в K_2 разів.

Частотний метод регулювання середньої потужності магнетрона здійснюється таким чином. Різницевий сигнал постійного струму, підсилений в $K_1 K_2$ разів, за допомогою інвертора UZ перетворюється в потужний сигнал змінного струму, частота якого пропорційна підсиленному різницевому сигналу за кое-

ффіцієнтом S_1 . Інвертор UZ має в своєму складі імпульсний генератор, частота чередування імпульсів якого Ω змінюється підсиленням різницею сигналом, що надходить до входу інвертора UZ [5].

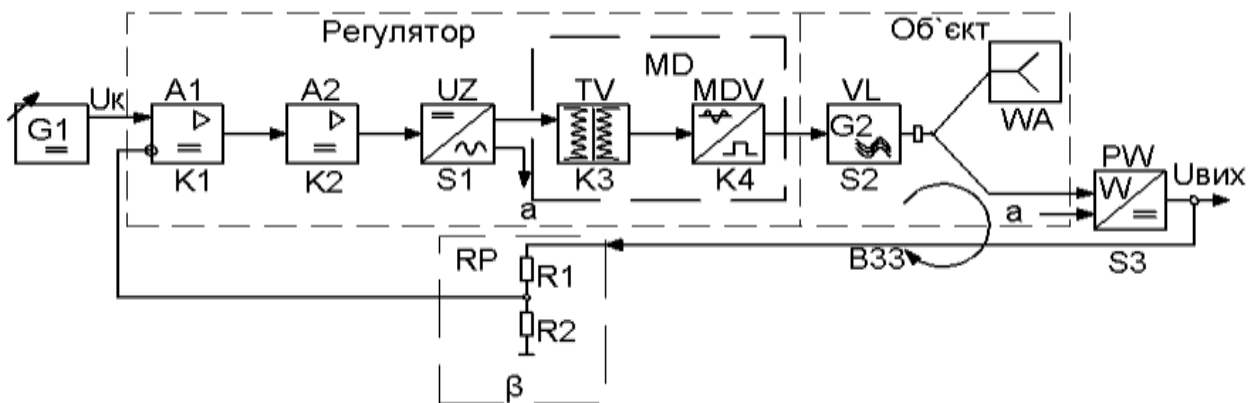


Рисунок 1 – Структурна схема автоматичного регулятора поглиненої потужності НВЧ зі статичними ланками (функціональними перетворювачами)

Далі, змінна за частотою Ω напруга надходить до входу модулятора MD в складі анодного трансформатора TV і діодно-конденсаторного перетворювача MDV високовольтної напруги гармонійної форми в імпульсну напругу. На відрізок тракту від виходу магнетрона VL до випромінювальної антени WA створюється інтерференційна суперпозиція падаючої та відбитої хвиль.

Поглинену навантаженням потужність $W_{\text{пор}}$ характеризує сумарний ефект інтерференції, тобто різниця квадратів електричних напруженностей ЕМП в будь-якому перетині вказанного відрізка тракту. Саме вимірювання цієї різниці, тобто поглиненої потужності, з високою точністю здійснює детекторний ватметр PW (рис.2).

Вихідну напругу постійного струму $U_{\text{вих}}$ поділено в β раз точним подільником напруги RP, який включено в коло від'ємного зворотного зв'язку (B33), та надходить до інверсного входу диференційного підсилювача A1, який виконує роль пристрою порівняння сигналів $U_{\text{к}}$ і $U_{\text{вих}}$.

Обходячи схему автоматичного регулятора по колу в напрямку, що вказаний стрілкою (рис.1), запишемо рівняння статичного стану замкненої структури як

$$(U_{\text{к}} - U_{\text{вих}} \beta) K_1 K_2 S_1 K_3 K_4 S_2 S_3 = U_{\text{вих}} \cdot \quad (1)$$

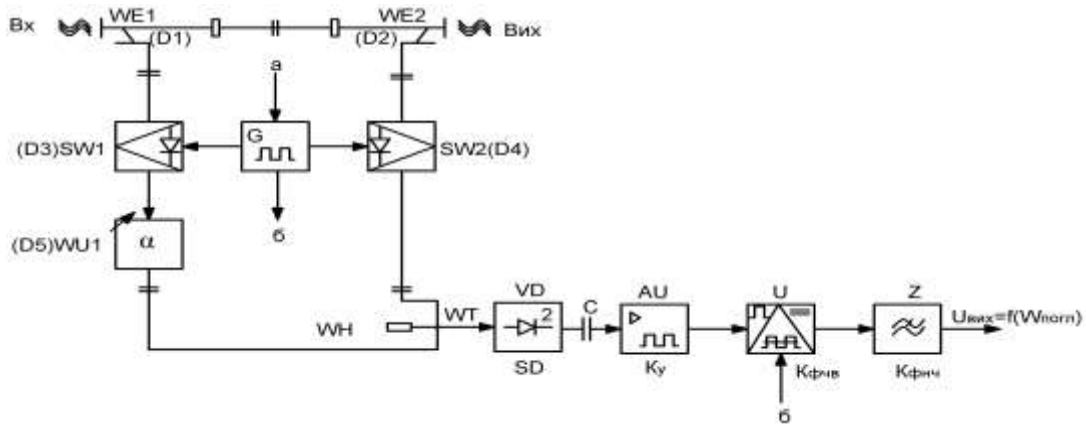


Рисунок 2 – Структурна схема детектора поглиненої НВЧ потужності

Позначимо $K = K_1 K_2 S_1 K_3 K_4 S_2$. Рівняння (1) набуває вигляду

$$(U_k - U_{\text{вих}} \beta) K S_3 = U_{\text{вих}}.$$

Зважимо, що $W_{\text{пор}} = U_{\text{вих}} / S_3$, тоді

$$W_{\text{пор}} = \frac{K}{1 + S_3 K \beta} U_k.$$

Якщо при глибокому ВЗЗ $S_3 K \beta \gg 1$, то

$$W_{\text{пор}} = U_k / S_3 \beta. \quad (2)$$

Вираз (2) є статичною формою узагальненого коефіцієнта передачі регулятора поглиненої потужності, який показує, що при глибокому ВЗЗ точність стабілізації поглиненої потужності визначається точністю встановлення сигналу керування U_k та похибкою коефіцієнта перетворення S_3 вимірювача поглиненої потужності.

2. Вимірювання поглиненої потужності

НВЧ сигнал, що відповідає падаючій хвилі, відгалужується від основного тракту напрямленими відгалужувачами WE1 та WE2 з перехідним послабленням D1 та D2 (рис.2). Обидва сигнали по чергову надходять через *p-i-n* вимикачі SW1 і SW2, атенюатор WU1, Е-плечі розв'язуючого подвійного Т-подібного мосту до квадратичного детектора VD.

Вимикачі SW1, SW2 керуються сигналами імпульсного генератора G, частоту яких синхронізовано відносно частоти змінної напруги, що сформована інвертором UZ (рис.1, зв'язок "а-а"). Для створення часового вікна проходження НВЧ імпульсів магнетрона, тривалість імпульсів генератора дорівнює півперіоду сигналу інвертора UZ, тоді, як тривалість НВЧ імпульсів дещо менша.

Вказана пара сигналів на вході детектора VD моделюється функціями

$$E_{\text{вх}}^{\text{пад}}[n\tau] = E_0^{\text{пад}} D_1 D_3 D_5 \cos(\omega t + \beta Z_1), \quad (3)$$

$$E_{\text{вх}}^{\text{від}}[n(\tau + 0,5T)] = E_0^{\text{від}} D_2 D_4 \cos(\omega t + \beta Z_2), \quad (4)$$

де D_3 , D_4 та D_5 – прямі послаблення вимикачів SW1, SW2 та атенюатора WU1; β – фазова постійна;

Z_1, Z_2 – просторові координати;

$E_0^{\text{пад}}, E_0^{\text{від}}$ – амплітуди напруженості ЕМП у поперечному перетині хвильоводу щодо падаючої та відбитої хвиль відповідно;

$[n\tau]$ та $[n(\tau + 0,5T)]$ – символ, що вказує на чередування НВЧ імпульсів з тривалістю τ та імпульсів, які зсунуті в часі на половину періода T .

На виході квадратичного детектора VD одержимо відповідну пару відеоімпульсів з амплітудами

$$U_{\text{VD}}^{\text{пад}}[n\tau] = (E_0^{\text{пад}} D_{\text{пад}})^2 S_{\text{VD}}, \quad (5)$$

$$U_{\text{VD}}^{\text{від}}[n(\tau + 0,5T)] = (E_0^{\text{від}} D_{\text{від}})^2 S_{\text{VD}}, \quad (6)$$

де $D_{\text{пад}} = D_1 D_3 D_5$, $D_{\text{від}} = D_2 D_4$, $D = D_{\text{пад}} = D_{\text{від}}$;

S_{VD} – коефіцієнт чутливості детектора VD.

Щоб не вийти за межі квадратичної ділянки характеристики детектора, сигнали (5), (6) не повинні відрізнятись більше ніж на 28 дБ [6]. Це досягається вибором послаблення елементів WE1, WE2, SW1, SW2 та WU1 з урахуванням максимальної потужності магнетрона та мінімального значення коефіцієнта відбиття від навантаження основного НВЧ каналу.

Різномірні сигнали (5), (6), що періодично чередуються, слід вважати однополярним безперервним амплітудно-модульованим сигналом з частотою модуляції, що дорівнює Ω . Виділивши роздільним конденсатором С змінну складову та підсиливши її вибірково підсилювачем змінного струму AU на частоті Ω , одержимо сигнал, який властивий методу періодичного порівняння [5]:

$$U_A(t) = \frac{K_y}{2} (U_{\text{VD}}^{\text{пад}} - U_{\text{VD}}^{\text{від}}) \text{sign} \sin(\Omega t + \Phi), \quad (7)$$

де sign – символ обвідної знаку періодичного процесу;

K_y – коефіцієнт підсилення на частоті Ω ;

Φ – початкова фаза.

Зауважимо, що потік потужності НВЧ через перетин прямокутного хвильоводу зі сторонами $a \times b$ дорівнює [6]

$$W = \frac{E_0^2 ab}{480\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}, \quad E_0^2 = K_0 W, \quad (8)$$

де K_0 – постійний коефіцієнт.

Після підстановки рівнянь (5), (6) в (7), з врахуванням (8), одержимо

$$U_A(t) = \frac{K_0 K_y S_{\text{VD}} D^2}{2} (W_{\text{пад}} - W_{\text{від}}) \text{sign} \sin(\Omega t + \Phi). \quad (9)$$

Сигнал (9) далі оброблюється фазо-чутливим випрямлячем U та фільтрується ФНЧ Z. Наприкінці одержимо вираз сигналу постійного струму на виході вимірювача поглиненої потужності НВЧ у вигляді

$$U_{\text{вих}} = S(1 \pm \gamma) W_{\text{пор}}, \quad (10)$$

де $S = \frac{K_0 K_\gamma S_D K_{\text{ФВЧ}} K_{\text{ФНЧ}} D^2}{2}$ – загальний коефіцієнт вимірювального перетворення;

γ – відносна похибка вимірювального перетворення поглиненої потужності.

Таким чином, похибку вимірювання γ обумовлено сумою середньоквадратичних відхилень коефіцієнтів, що входять до (10), від номінального значення. Аналіз показує, що кожен з них є достатньо стабільним за тривалий час, щоб зробити висновок про метрологічну надійність вимірювача, його здатність не виходити на протязі міжатастаційного періоду за межу значення похибки, встановленої при метрологічній атестації. Тобто, значення похибки γ зумовлюється похибкою атестації – поелементної чи вимірювального тракту в цілому за допомогою зразкової міри НВЧ потужності, що забезпечить це значення в межах $\pm (3...4)\%$.

3. Динамічні властивості ватметра в автоматичному регуляторі поглиненої потужності

Визначимо функцію передачі регулятора, для чого потрібно представити його структурну схему (рис. 1) з'єднанням динамічних ланок (рис. 3). Підсилювачі А1, А2 та інвертор UZ подамо як одну підсилювальну ланку з функцією передачі $W_1(p) = K_1 K_2 K_3$. Підсилювальною ланкою представимо магнетрон VL, при цьому коефіцієнт S_2 за фізичною сутністю є його електронним к.к.д. Анодний трансформатор TV є інерційною диференційною ланкою з функцією передачі $W_2(p) = \frac{K_3 p}{T_1 p + 1}$ [7].

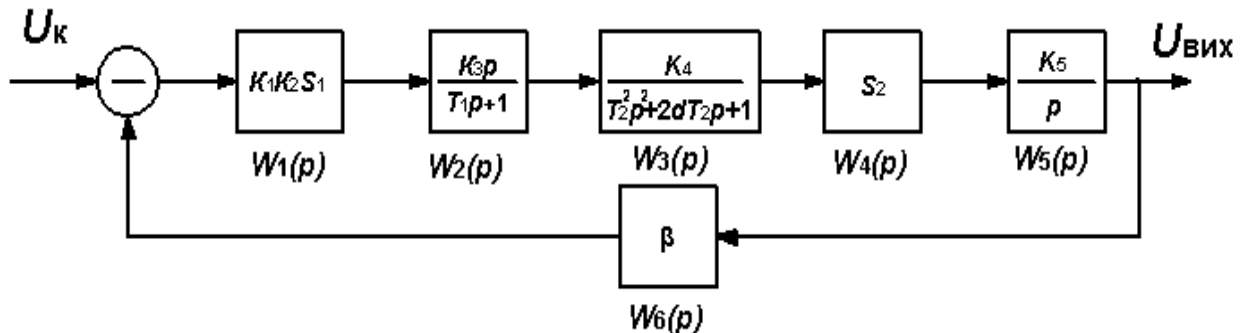


Рисунок 3 – Структурна схема автоматичного регулятора поглиненої НВЧ потужності з динамічними ланками

Схему формування від'ємного анодного імпульсу MDV подамо як коливальну інерційну ланку за наступними ознаками. По-перше, ця схема містить два накопичувача енергії – конденсатор C та індуктивність вторинної обмотки трансформатора TV. По-друге, осцилограма обвідної імпульса має характерні ознаки перехідної характеристики інерційної коливальної ланки. Тому є підстава записати функцію передачі ланки MDV в наступному вигляді

$$W_3(p) = \frac{K_4}{T_2^2 p^2 + 2dT_2 p + 1},$$

де d – коефіцієнт затування коливального процесу.

Вимірювач поглиненої потужності PW уявимо як інтегруючу динамічну ланку з функцією передачі $W_5(p) = \frac{K_5}{p}$.

Загальною особливістю інтегруючих ланок є їх здатність утримувати протягом певного часу значення періодичного процесу на їх вході. Саме це властиво вимірювачу PW – його ФНЧ виконує інтегруючу функцію.

Позначимо $W_{15}(p) = \prod_{i=1}^5 W_i(p)$; $K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 S_1 S_2$; $a_0 = T_1 \cdot T_2^2$; $a_3 = 1 + K\beta$; $a_1 = 2d \cdot T_1 \cdot T_2 + T_2^2$; $a_2 = T_1 + 2d \cdot T_2$.

Передаточна функція автоматичного вимірювача – регулятора має вигляд

$$W(p) = \frac{W_{15}(p)}{1 + W_{15}(p)W_6(p)} = \frac{K}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}. \quad (11)$$

Характеристичне рівняння за знаменником (11) – це рівняння третього порядку:

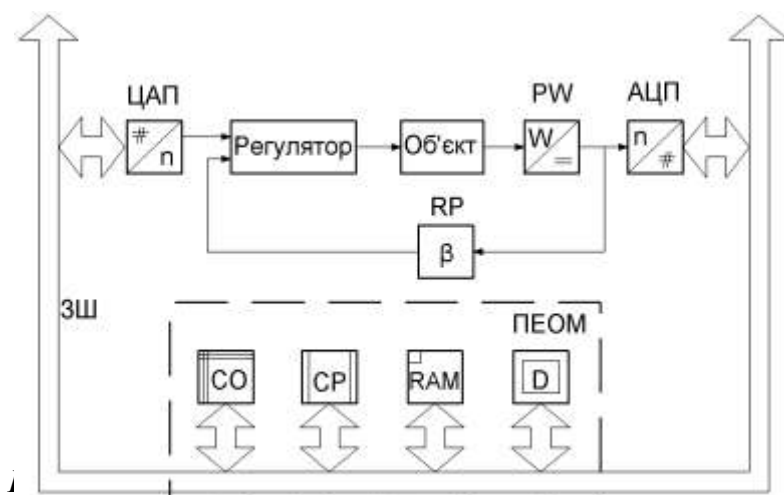
$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0. \quad (15)$$

Для забезпечення динамічної стійкості необхідно виконати умови, що встановлені за критеріями Гурвиця [7]:

$$a_0 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0; \\ a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Перевірка динамічної стійкості може бути здійснена за відомими постійними часу динамічних ланок. Так, при реальних значеннях $a_0 = 0,01 \text{ с}^3$ ($T_1 = 0,01 \text{ с}$, $T_2 = 1 \text{ с}$), $a_1 = 1 \text{ с}^2$ ($d = 0,01$), $a_2 = 0,03 \text{ с}$, $a_3 = 2$ значення $a_1 a_2 - a_0 a_3 = 0,01$, тобто більше нуля, що забезпечує динамічну стійкість схеми.

На рис.4 наведено структурну схему автоматичної комп'ютерної системи регулювання поглиненої НВЧ потужності. Функцію аналогового джерела постійного струму, яке подає на регулятор напругу керування U_k виконує ЦАП, яким керує ПЕОМ. Вихідний сигнал вимірювача поглиненої потужності НВЧ подано на ПЕОМ через АЦП. Закон регулювання поглиненої потужності задається технологічною програмою, що внесена в загальний пакет. Звичайно, ПЕОМ не замкнено лише на регулюванні та вимірюванні поглиненої НВЧ потужності, нею обслуговується технологічний процес в цілому.



Рисуюнок 4 – Структурна схема автоматизованої

Рисуюнок 4 – Структурна схема автоматизованої

комп'ютерної системи регулювання поглиненої НВЧ потужності

Висновки

Особливості мікрохвильових технологій обробки матеріалів потребують стабілізувати НВЧ потужність на різних рівнях для обробки матеріалів в залежності від технологічних потреб, а подібні технологічні вимоги можуть бути задоволені лише за допомогою автоматичної системи регулювання поглиненої НВЧ потужності.

Запропоноване технічне рішення детекторного ватметра розв'язує проблему досягнення інваріантності теплофізичного стану об'єкта в мікрохвильовому полі шляхом застосування замкненої системи із сильним зворотним зв'язком, відносна похибка регулювання якого складає $\pm(3...4)\%$.

Перевірка динамічного стану ватметра дозволила виявити діапазон параметрів ($T_1 = 0,01$ с, $T_2 = 1$ с, $d = 0,01$), коли забезпечується стійкість схеми вимірювання та регулювання.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні радіотехнічних систем мікрохвильової обробки матеріалів та речовин, а також в напрямку розширення можливостей діючих автоматичних ватметрів в складі регуляторів поглиненої потужності НВЧ в радіохвильових системах визначення параметрів контролю та складу речовин.

Література

1. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур. – М.: Сов.радио, 1977. – 208с.
2. Булат В.М., Водотовка В.И., Репа Ф.М. Способ керування процесом сушіння в мікрохвильовому полі / Патент №40489 (Україна). Опубл. Бюл. № 4. – 2001.
3. Балюк В.С., Тузов Д.М., Водотовка В.И., Дзюба В.П. Опыт разработки приборов СВЧ-энергии народнохозяйственного назначения // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы. – Одесса: ОКФА, 1998. – С. 46-52.
4. Сапурнов Г.С. Ремонт микроволновых печей. Серия "Ремонт". – Вып. №19. – М.: СОЛОН, 1998. – 270 с.
5. Григорьян Р.Л., Скрипник Ю.А., Шалдыкин О.К. Анализаторы характеристик радиоэлектронных устройств. – К.: Техника, 1981. – 248 с.
6. Баскаков С.И. Основы электродинамики. – М.: Сов. радио, 1973. – 248 с.
7. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 510 с.

Водотовка В.И., Данилевская В.Г., Репа Ф.М. Детекторный ватметр поглощенной СВЧ мощности. Предложен автоматический измеритель – ваттметр в составе регулятора поглощенной мощности радиотехнической системы СВЧ технологического назначения. Проведен анализ его статического и динамического	Vodotovka V.I., Danilevska V.G., Repa F.M. Detector wattmeter of the absorbed microwave power. The automatic measuring set – a wattmeter in structure of a control of the absorbed power of a radio engineering system of microwave technological designation is offered. The analysis of its static and dynamic conditions is carried
---	--

<p>состояний. Определена область существования параметров, при которых достигается динамически устойчивая работа регулятора.</p>	<p>out. The area of existence of parameters at which dynamic steady work of a control is achieved is determined.</p>
--	--

*Надійшла до редакції
23 березня 2004 року*