

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзко И.А. Электроснабжение сельского хозяйства: Учебное пособие для вузов / И.А. Будзко, Н.М. Зулъ / Под редакцией И.А. Будзко. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.

2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия,

1970. – 432 с.

3. Трехфазный трансформатор: патент 2244 Респ. Беларусь, МКП7 Н01F 30/12 /А.П.Сердешнов, Г.И. Янукович, Е.А.Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявитель УО БГАТУ. –№950299; заявл. 09.06. 95; опубл. 30.09.98// Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. —1998– №3 (18).– С.216-217.

УДК 631.56:543.712.08

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.04.2006

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЧ-ВЛАГОМЕРОВ НА ОСНОВЕ ВИДЕОДЕТЕКТИРОВАНИЯ

В.В. Лисовский, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ)

Аннотация

Рассмотрены вопросы повышения точности измерения влажности сверхвысокочастотными влагомерами.

Приведены результаты исследования одного из наиболее распространенных типов промежуточных преобразователей на основе видеодетектирования.

Результаты исследований нашли практическое применение при разработке некоторых моделей сверхвысокочастотных влагомеров серии «Микрорадар».

Введение

Одной из основных задач современного сельскохозяйственного производства является создание высококачественной продукции при минимизации ее себестоимости на основе применения новейших энерго- и ресурсосберегающих технологий. В связи с этим резко возрастают требования к соблюдению технологической дисциплины и повышению достоверности контроля параметров перерабатываемого материала, одним из которых является влажность.

В настоящее время в республике разработан и серийно выпускается ряд сверхвысокочастотных (СВЧ) влагомеров для непрерывного и дискретного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Они имеют существенные преимущества перед традиционными емкостными влагомерами и, в первую очередь, значительно более высокие метрологические характеристики [1]. Дальнейшее повышение их точности неразрывно связано с оптимизацией параметров первичных и промежуточных измерительных преобразователей сверхвысокочастотных устройств контроля влажности. Оптимизации параметров первичных измерительных СВЧ-преобразователей влажности посвящено достаточно много работ как в нашей стране, так и за рубежом.

[2], в то же время практически отсутствуют аналогичные исследования по промежуточным измерительным преобразователям.

Цель данной работы – выявление наиболее существенных элементов промежуточных преобразователей на основе видеодетектирования, вносящих основной вклад в их результирующую погрешность.

Основная часть

В измерительных преобразователях данного типа в качестве чувствительного элемента, в котором осуществляется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал постоянного тока, используется детекторный СВЧ-диод.

Структурная схема простейшего промежуточного измерительного преобразователя (ПРИП) с детекторным СВЧ-диодом представлена на рис. 1.

Схему ПРИП такого типа будем называть прямопоказывающей. В качестве детекторных диодов в СВЧ-влагомерах наиболее часто используются точечные диоды (Д 604, Д 605), а также диоды с барьером Шоттки (КА 203А). Теория выпрямления, разработанная Шотки, применима как к точечным диодам, так и к диодам с барьером Шоттки.

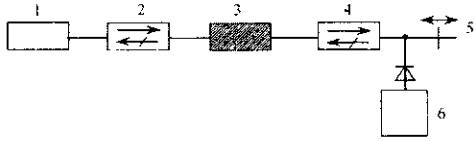


Рис. 1. Структурная схема ПИИ прямопоказывающего типа на основе детекторного СВЧ-диода: 1 – генератор; 2, 4 – ферритовые вентили; 3 – первичный измерительный преобразователь (ПИИ); 5 – детекторная секция; 6 – измеритель тока или измеритель напряжения

Получим основные соотношения, связывающие величину СВЧ-мощности, поступающей на детекторный диод, с величиной протектированного сигнала. Для этого рассмотрим эквивалентную схему детекторного диода, включенного в СВЧ-тракт волномера (рис. 2). На схеме графическое изображение диода соответствует только непосредственно выпрямляющему переходу. Кроме того, на схеме показаны ёмкость перехода C_j , сопротивление перехода по СВЧ R_j , индуктивность и ёмкость патрона L_n и C_p , соответственно.

Для предотвращения замыкания СВЧ-диода по постоянному току и компенсации индуктивной проводимости патрона L_n один из электродов диода отделён от волноводного тракта посредством конструктивной разделительной ёмкости C_p . Примем, что к СВЧ-диоду приложено СВЧ-напряжение, амплитуда которого U_0 . Тогда, мощность P , поглощаемая СВЧ-диодом, в предположении, что $j\omega L_n = \frac{1}{j\omega C_p}$, даётся уравнением [1]:

$$P = \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{\frac{1}{R_j} \left(1 + \frac{r_s}{R_j} \right) + \omega^2 C^2 r_s}{\left(1 + \frac{r_s}{R} \right)^2 + \omega^2 C^2 r_s}, \quad (1)$$

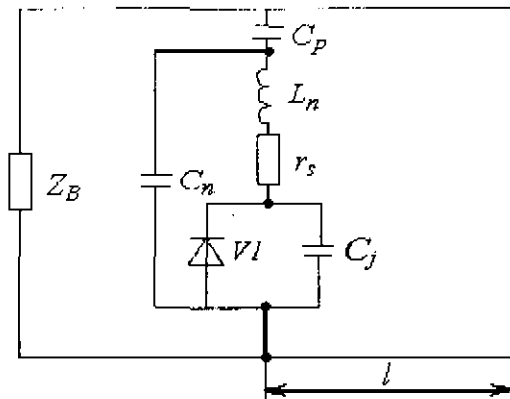


Рис. 2. Эквивалентная схема детекторного диода, включённого в волноводный тракт: Z_n – волновое сопротивление волновода; C_n – ёмкость патрона; C_p – конструктивная разделительная ёмкость; L_n – индуктивность патрона; C_j – ёмкость барьера; $V1$ – выпрямляющий переход; l – расстояние от места включения детекторного диода до плоскости короткого замыкания

где R_j – сопротивление барьера диода на СВЧ.

Из приведённой эквивалентной схемы СВЧ-диода следует, что только часть СВЧ-напряжения приложена непосредственно к выпрямляющему барьеру:

$$U_b^2 = \frac{U_0^2}{\left(1 + \frac{r_s}{R_j} \right)^2 + \omega^2 C^2 r_s^2}, \quad (2)$$

где U_b – СВЧ-напряжение, приложенное к барьеру диода.

Из (1) и (2) находим связь между поглощённой диодом мощностью и напряжением барьера U_b :

$$P = \frac{U_b^2}{2} \left[\frac{1}{R_j} \left(1 + \frac{r_s}{R_j} \right) + \omega^2 C^2 r_s \right]. \quad (3)$$

Для получения явного вида для R_j воспользуемся уравнением Шоттки [3]:

$$I = I_s (e^{\alpha U_b} - 1), \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{q}{nkT}$; I_s – ток насыщения, зависящий

от высоты барьера, площади контакта, температуры и некоторых других величин;

q – заряд электрона;

T – температура;

k – постоянная Больцмана;

n – коэффициент “неидеальности”, значение которого лежит в пределах 1.05...1.5.

Примем, что, кроме переменного СВЧ-напряжения, $-U = U_b \cos \omega t$. К барьеру приложено напряжение смещения E_{cm} .

Тогда

$$I = I_s \left(e^{\alpha(U_b \cos \omega t + E_{cm})} - 1 \right). \quad (5)$$

Из (5) находим амплитуду Im_1 первой гармоники СВЧ-тока, текущего через барьер:

$$Im_1 = 2I_s e^{\alpha E} B_1(\alpha U_b), \quad (6)$$

где $B_1(\alpha U_b)$ – модифицированная функция Бесселя от чисто мнимого аргумента 1-го порядка.

Так как $R_j = \frac{U_b}{Im_1}$, то из (6) находим

$$\frac{1}{R_j} = 2 \frac{I_s e^{\alpha E}}{U_b} B_1(\alpha U_b). \quad (7)$$

Разлагая в степенной ряд (7), получаем

$$\frac{1}{R_j} = \alpha I_s e^{\alpha E} \left[1 + \frac{1}{8} (\alpha U_b)^2 + \dots \right]. \quad (8)$$

При нулевом внешнем смещении и при небольших сигналах

$$\frac{1}{8} (\alpha U_b)^2 \ll 1; \quad \frac{1}{R_j} \approx \alpha I_s. \quad (9)$$

Величина α для кремневых диодов типа D 604 колеблется в пределах 20...35 B^{-1} , $I_s = 10^{-7} \dots 10^{-5} A$ [4]. Таким образом, сопротивление барьера $R_j = 3 \dots 500 \text{ кОм}$. В большинстве случаев $R_j \approx 10 \text{ кОм}$.

Как следует из (8), с увеличением тока внеш-

него смещения $I_{cm} = I_s (e^{\alpha E_{cm}} - 1)$ сопротивление R_j уменьшается:

$$\frac{1}{R_j} = \alpha (I_s + I_{cm}). \quad (10)$$

Так для диода КА 203А при $I_{cm} = 20 \text{ мкА}$; $R_j \approx 1 \dots 2 \text{ к}$, а для диода D 604 при $I_{cm} = 50 \text{ мкА}$; $R_j \approx 500 \dots 900 \text{ Ом}$ [4].

Установим связь между выпрямленным напряжением холостого хода U_0 на диоде (сопротивление во внешней цепи диода отсутствует) и уровнем поглощённой СВЧ-мощности. В этом случае постоянная составляющая I_0 тока, текущего через переход, должна обращаться в ноль, в противном случае будет происходить постоянный заряд конденсатора C_p . Из (5) находим:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e^{\alpha (U_s \cos \frac{2\pi}{T} t + E_{cm} + U_0)} dt = 0. \quad (11)$$

Интегрируя (11), получаем:

$$U_0 = E_{cm} - \frac{1}{\alpha} \ln B_0 (\alpha U_b). \quad (12)$$

Таким образом, наличие E_{cm} при работе диода в режиме генератора напряжения не изменяет его чувствительность по напряжению.

Разлагая (12) в ряд, имеем (при $E_{cm} = 0$):

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2 + \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4 + \dots \quad (13)$$

При условии, что $\frac{\alpha}{4} U_b^2 \gg \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4$, имеет место

квадратичное детектирование. Подставляя (3) и (9) в (13), находим

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2. \quad (14)$$

$$U_0 = -\frac{P}{2} \alpha \frac{r_s}{(r_s I_s \alpha) (1 + r_s I_s \alpha) (w C r_s)^2}. \quad (15)$$

Оценим порядок входящих в (15) величин $r_s = 10 \dots 50 \text{ Ом}$; $C \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$; $w = 6.28 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$; $I_s \alpha \approx 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}$ [4]. Следовательно, выполняется условие: $r_s I_s \alpha \ll (w C r_s)^2$.

С учётом этого неравенства (15) преобразуется к виду:

$$|U_0| = \frac{\alpha P}{2 r_s w^2 C^2}. \quad (16)$$

Таким образом, напряжение холостого хода детектора прямо пропорционально поглощённой диодом мощности при условии, что эта мощность невелика.

Величина напряжения зависит от коэффициента $\frac{\alpha}{2 r_s w^2 C^2}$, который носит название чувствительности СВЧ-детектора по напряжению $-\gamma$. Именно факт прямо пропорциональной зависимости между U_0 и P используется в ПРИП СВЧ-влагомеров. Так

как параметром преобразования в методе поглощения является ослабление СВЧ-энергии $N_{\text{дБ}}$, то логарифм напряжения U_0 пропорционален N .

Установим соотношения, позволяющие оценить величину погрешности δN (дБ), обусловленную отклонением U_0 от квадратичного закона по отношению к U_b . Для этого воспользуемся (13), учитывая два члена ряда разложения:

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2 + \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4. \quad (17)$$

Из (3) следует, что

$$\frac{U_b^2}{2} = \frac{P}{w^2 C^2 r_s}. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17), получаем соотношение для U_0 :

$$U_0 = -\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2, \quad (19)$$

где $\gamma = \frac{\alpha}{2 r_s w^2 C^2}$ - чувствительность по напряжению (для диодов D 604 $\gamma \approx 4.2 \text{ В/мВт}$). Согласно определению:

$$N = 4.343 \ln \frac{P_0}{P}, (\text{дБ}), \quad (20)$$

где P_0 и P - соответственно мощности, поглощённые СВЧ-детектором до и после внесения ВМ в ПРИП.

Примем, что U_0 соответствует поглощённой детектором мощности P_0 .

Тогда из (20) находим:

$$N_1 = 4.343 \ln \frac{U_0^0}{U_0} = 4.343 \ln \frac{-\gamma P_0 + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P_0^2}{-\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2}. \quad (21)$$

Выражение под знаком логарифма можно преобразовать:

$$\frac{\gamma P_0 + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P_0^2}{-\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2} \approx \frac{P_0}{P} - \frac{\alpha}{4} \gamma \frac{P_0^2}{P} + \frac{\alpha}{4} \gamma P_0. \quad (22)$$

Учитывая (20) и (22), находим выражение для погрешности $\delta N_{\text{кв}}$:

$$\delta N_{\text{кв}} = N_1 - N = 4.343 \ln \left(1 - \frac{\alpha}{4} \gamma P_0 \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \right). \quad (23)$$

При $\frac{P}{P_0} \ll 1$ величина $\delta N_{\text{кв}}$ не зависит от абсолютного значения P :

$$\lim_{\frac{P}{P_0} \rightarrow 0} \delta N_{\text{кв}} = 4.343 \ln \left(1 - \frac{\alpha}{4} \gamma P_0 \right). \quad (24)$$

Из (24) можно найти абсолютное значение мощности P_0 , при котором погрешность $\delta N_{\text{кв}}$ не превышает некоторое заданное значение $\delta N_{\text{кв}}^0$.

$$P_0 \leq \frac{4}{\gamma \alpha} \left(1 - e^{\frac{\delta N_{\text{кв}}^0}{4.343}} \right). \quad (25)$$

Или в децибелах:

$$\frac{dN}{dT} \approx 4.343 \left(\frac{\Delta E_0}{kT^2} - \frac{1}{T} \right). \quad (36)$$

Подставляя численное значение $\Delta E_0 = 0.08$ э.в. [1]

получаем, что $\frac{dN}{dT} \approx 0.03 \frac{dB}{град}$ при 300 К. Полученное расчётное значение $\frac{dN}{dT}$ хорошо согласуется

с экспериментальными данными (рис. 4). Суммарная дополнительная погрешность ξ_{NT} , обусловленная влиянием температуры: в ПРИП данного типа, складывается из двух составляющих: температурной погрешности

детекторного СВЧ-диола $\frac{dN_s}{dT}$ и температурной погрешности СВЧ-генератора:

$$\xi_{NT} = \frac{dN_s}{dT} + \frac{dN_g}{dT}. \quad (37)$$

Наиболее часто в качестве генераторов в СВЧ-волномерах используются генераторы на диодах Ганна (ДГ). На рис. 5 представлена температурная зависимость мощности $P(t)$ генератора на ДГ АА 723 на частоте 10 ГГц, построенная на основании данных, приведённых в [1].

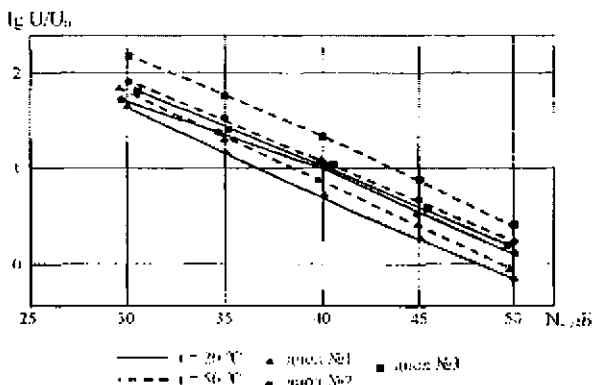


Рис. 4. Зависимость выпрямленного напряжения на детекторных диодах от ослабления N при различных температурах

Из графика находим, что при $T = 300$ К величина

$$\frac{dN_g}{dT} \approx -0.02 \frac{dB}{град}. \text{ Следовательно, } \frac{dN_s}{dT} \text{ и } \frac{dN_g}{dT}$$

имеют разные знаки, и суммарная погрешность $\xi_{NT} \approx 0.01 \frac{dB}{град}$. Таким образом, инструментальная погрешность выходного сигнала данного ПРИП практически не подвержена влиянию температуры.

Оценим динамический диапазон ΔN измеряемых ослаблений СВЧ-энергии в рассматриваемом случае. Согласно [5] тангенциальная чувствительность $P_{\%}$ точечных детекторных диодов составляет величину 50...55 дБ от уровня 1 мВт, т.е. $10^{-8} \dots 3 \cdot 10^{-9}$ Вт. Учитывая, что уже при $P = 6$ мВт погрешность $\delta N_{\%} = 1$ дБ, находим, что $\Delta N < 28 \dots 33$ дБ.

Такой динамический диапазон соответствует, как это следует из [1], чувствительности параметра преобразования $S_{s,w} = 1 \frac{dB}{\%}$. Следовательно, в рассматриваемом ПРИП реализуется измерение параметра преобразования с систематической погрешностью, выраженной в процентах влажности и составляет величину $\pm 0,5\%$.

Выше рассмотрены метрологические характеристики ПРИП, выполненные по прямопоказывающей схеме, когда детекторный диод работает в режиме генератора напряжения. Исследуем основные параметры ПРИП для случая, когда детекторный диод работает в режиме генератора тока.

Постоянная составляющая тока, текущего через короткозамкнутый контур, определяется уравнением

$$I_0 = \frac{I_s + I_{cn}}{T} \int_0^T \left(e^{\alpha U_s \cos \frac{2\pi}{T} t} - 1 \right) dt. \quad (38)$$

После интегрирования имеем:

$$I_0 = (I_s + I_{cn}) \left\{ B_0(\alpha U_s) - 1 \right\}. \quad (39)$$

Разлагая (39) в степенной ряд, получаем:

$$I_0 = (I_s + I_{cn}) \left[\frac{1}{4} (\alpha U_s)^2 - \frac{1}{64} (\alpha U_s)^4 + \dots \right]. \quad (40)$$

Ограничиваясь первым членом в (40), выражая U_s^2 через P из (3) и учитывая (10), имеем

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + w^2 C_j^2 r_s Rj \right]. \quad (41)$$

Выражение (41) соответствует случаю, когда короткозамкнутый контур подключён непосредственно к барьеру. Однако в реальных условиях контур подключается к переходу через сопротивления растекания r_s . Считая, что внутреннее сопротивление перехода по постоянному току равно Rj (это имеет место при малых сигналах), переносим (41) в следующем виде

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + w^2 C_j^2 r_s Rj \right] - I_0 \frac{r_s}{Rj}, \quad (42)$$

откуда находим:

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 - \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) w^2 C_j^2 r_s Rj \right]. \quad (43)$$

Отношение $\beta = \frac{I_0}{P}$ есть чувствительность детек-

торного диода по току:

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 + \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) w^2 C_j^2 r_s Rj \right]. \quad (44)$$

Из (44) следует, что чувствительность детекторного диода по току зависит от Rj , который связан с ним

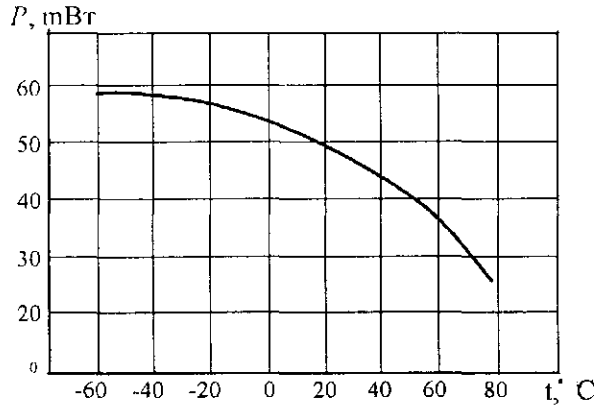


Рис. 5. Зависимость мощности генератора на диоде AA 723A от температуры на частоте 10 ГГц

выражением (10).

Дифференцируя знаменатель (44) и приравнявая производную к нулю, находим, что чувствительность по току достигает максимума, когда R_j удовлетворяет уравнению:

$$R_j^3 - \frac{2}{w^2 C^2} R_j r_s - \frac{2r_s}{w^2 C^2} = 0. \quad (45)$$

Согласно [1] решение этого уравнения выражается формулой:

$$R_j = 2 \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{wC} \cos \frac{\varphi}{3}, \quad (46)$$

$$\text{где } \varphi = \arccos \left[\left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} r_s wC \right].$$

$$\text{Так как } \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} r_s wC \ll 1, \text{ то } \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Следовательно,

$$R_{j \text{ опт}} = \frac{\sqrt{2}}{wC}. \quad (47)$$

Подставляя в (47) выражение для R_j (10), получаем уравнение для тока $I_{см \text{ опт}}$, при котором наблюдается максимальная чувствительность:

$$I_{см \text{ опт}} = \frac{wC}{\alpha \sqrt{2}} - I_s. \quad (48)$$

Из полученного выражения следует, что, чем выше частота w , тем больший ток $I_{см}$ надо пропускать через диод. Подстановка в (47) и (48) численных значений $w = 6.28 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$; $C = 3 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$; $\alpha = 30 \text{ В}^{-1}$ приводит к следующим оценкам: $R_{j \text{ опт}} = 750 \text{ Ом}$, $I_{см \text{ опт}} = 440 \text{ мкА}$;

$$\beta_{\text{ макс}} = 9,48 \frac{\text{А}}{\text{Вм}}.$$

Экспериментальные значения $I_{см \text{ опт}}$ обычно приблизительно в 2 раза меньше. Это обусловлено тем, что при выводе (48) не учитывалось отражение СВЧ-мощности от диода. Если по аналогии с (31) ввести обобщенную чувствительность по току $\beta_{об}$, то:

$$\beta_{об} = (1 - |\Gamma|^2) \beta. \quad (49)$$

Так как при пропускании тока $I_{см}$ через диод условие $\frac{r_s}{R_j} \ll w^2 C^2 r_s^2$ уже не выполняется, то из

(29) имеем:

$$R_g = \frac{R_j}{1 + w^2 C^2 r_s R_j}. \quad (50)$$

Очевидно, что:

$$1 - \Gamma^2 = \frac{4R_g Z_B}{(R_g + Z_B)^2}. \quad (51)$$

Так как $\frac{R_g}{Z_B} < 0.5$, то из (51) получаем прибли-

женное выражение:

$$1 - \Gamma^2 = \frac{4}{Z_B} \frac{R_j}{(1 + w^2 C^2 r_s R_j)} \left(1 - 2 \frac{R_j}{Z_B (1 + w^2 C^2 r_s R_j)} \right). \quad (52)$$

Подстановка (52) в (49) и последующее дифференцирование по R_j приводит к следующему выражению для $R_{j \text{ опт}}$

$$R_{j \text{ опт}}^2 - \frac{R_j}{w^2 C^2 r_s} (2 + w^2 C^2 r_s Z_0) + \frac{Z_0}{w^2 C^2 r_s} = 0. \quad (53)$$

Решение (53) для принятых значений r_s , w , C и Z_0 приводит к следующим оценкам:

$$R_{j \text{ опт}} = 1680 \text{ Ом}, I_{см \text{ опт}} = 200 \text{ мкА}, \beta_{\text{ макс}} = 6,41 \frac{\text{А}}{\text{Вм}}.$$

Полученные значения $R_{j \text{ опт}}$, $I_{см \text{ опт}}$ и $\beta_{\text{ макс}}$ хорошо согласуются с экспериментом.

Выигрыш в чувствительности при пропускании через диод тока $I_{см}$ по отношению к чувствительности β , когда $I_{см} = 0$, составляет по расчёту и по эксперименту величину 5...6дБ.

Обратимся к оценке погрешности δN_{kl} , обусловленной отклонением I_0 от квадратичного закона по отношению к U_b . Аналогично тому, как это делалось при выводе (43), получаем:

$$I_0 = \beta P + \frac{1}{4(I_s + I_{см})} \beta^2 P^2. \quad (54)$$

Следовательно, с учетом (23)

$$\delta N_{kl} = 4.343 \ln \left[1 + \frac{P_0 \beta}{4(I_0 + I_{см})} \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \right]. \quad (55)$$

Абсолютное значение мощности P_0 , при котором погрешность δN_{kl} не превышает заданное значение δN_{kl}^0 дается выражением

$$P_0 \leq \frac{4(I_0 + I_{см})}{\beta} (e^{\frac{\delta N_{kl}}{4.343}} - 1). \quad (56)$$

Из сравнения (43) и (54) находим, что δN_{ku} и δN_{kl} имеют разные знаки $\delta N_{kl} > 0$, $\delta N_{ku} < 0$. Однако основное отличие между ними состоит в том, что, если величина δN_{ku} зависит только от индивидуальных свойств детекторного диода и является величиной неизменной, то δN_{kl} можно изменять в широких пределах,

меня величину тока смещения. Если принять, что $I_{см} = I_{см\text{ при}} = 200 \text{ мкА}$, $\beta = \beta_{\text{ макс}} = 6,41 \frac{\text{А}}{\text{Вт}}$, то расчёт

по формуле (56) даёт при $\delta N_{\text{ кт}} = 1 \text{ дБ}$ оценку для $P_0 \leq 32 \text{ мкВт}$, что на 7 дБ превышает соответствующее значение, когда детекторный диод работает в режиме генератора напряжения. Таким образом, изменяя ток $I_{см}$, можно значительно расширить динамический диапазон линейной зависимости между P и I_0 .

Действительно, тангенциальная чувствительность $P_{\text{ в}}$ обратно пропорциональна β [1, 6]:

$$P_{\text{ мин}} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\beta} \sqrt{\frac{1}{Rf} + \frac{I}{2kT}} = \quad (57)$$

$$= \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\beta} \sqrt{(I_0 + I_{см})} \sqrt{\left(\alpha + \frac{I}{2kT}\right)}$$

где $k = \text{const}$;

Δf – ширина полосы пропускания индикаторного устройства.

Комбинируя (56) и (57), находим:

$$\Delta N = 4,343 \ln \frac{(I_0 + I_{см})}{\sqrt{4kT\Delta f} \sqrt{\alpha + \frac{I}{2kT}} \sqrt{I + I_{см}}} \quad (58)$$

$$= 4,343 \ln \frac{\sqrt{(I_0 + I_{см})}}{\sqrt{4kT\Delta f} \left(\alpha + \frac{I}{2kT}\right)}$$

Таким образом,

$$\Delta N \approx \ln(I_0 + I_{см})^2 \quad (59)$$

Оценим степень влияния температуры на чувствительность детекторного диода по току. Аналогично тому, как это делалось ранее при выводе температурного коэффициента по напряжению, получаем:

$$\xi_{\text{ в}} = 4,343 \frac{1}{\beta_{\text{ в}}} \frac{d\beta_{\text{ в}}}{dT} =$$

$$= 4,343 \left[\frac{1}{1 - |r|^2} \frac{d(1 - |r|^2)}{dT} + \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} \right] \quad (60)$$

Согласно [1, 6, 7] $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -1,7 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$ при

токе $I_{см} = 50 \text{ мкА}$ и $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ при $I_{см} = 15 \text{ мкА}$.

Дифференцирование выражения (61) по температуре и последующая подстановка численных значений дают:

$$\frac{1}{1 - |r|^2} \frac{d(1 - |r|^2)}{dT} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ град}.$$

Таким образом,

$$\xi_{\text{ в}} = 4,343 \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = \left\{ \begin{array}{l} -7 \cdot 10^{-2} \text{ дБ/град при } I_{см} = 50 \text{ мкА} \\ -2,6 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/град при } I_{см} = 15 \text{ мкА} \end{array} \right\}$$

Выводы

Результаты расчетов показывают что суммарная погрешность $\xi_{N,T}$ в ПРИП с детекторным диодом, работающем в режиме генератора тока, имеет значение $\approx -0,1 \text{ дБ/град}$, т.е. на порядок выше, чем в ПРИП с

детекторным диодом, работающем в режиме генератора напряжения, в то же время динамический диапазон у него достигает 60 – 65 дБ. Все это необходимо учитывать при проектировании СВЧ-влагомеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бензарь В.К. Техника СВЧ-влагометрии. – М.: Высшая школа, 1974. – 352с.
2. Лисовский В.В. Контроль влажности сельскохозяйственных материалов электрофизическими методами и пути повышения точности влагомеров. // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – Деп. в ВИНТИ. № 1278 – В 2005. – №12 – 40с.
3. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980. – 463с.
4. Родионов В. М. Линии передачи и антенны СВЧ. – М.: 1965. – 292с.
5. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергия, 1980. – 247с.
6. Мериакри В.В. и др. Под ред. Б.З. Каценеленбаума. Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. – М.: Наука, 1972. – 238 с.
7. Валигов Р.А. Сретенский В.П. Радиотехнические измерения. – М.: Советское радио, 1970. – 350с.

Редакция журнала «Агропанорама»

приглашает к сотрудничеству представителей академической, вузовской, отраслевой науки и производства.

Надеемся, что ваши докторанты, аспиранты, соискатели и магистранты станут подписчиками нашего издания и авторами статей. Рассмотрим предложения по выпуску специальных номеров журнала «Агропанорама».

Телефоны редакции: 267-22-14; 267-30-12.