

# МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЧ-ВЛАГОМЕРОВ НА ОСНОВЕ АВТОДИНА

В.В. Лисовский, канд. техн. наук, доцент, М.И. Булко, В.В. Гончарик, инженеры  
(УО БГАТУ)

## Аннотация

Приведены результаты разработки промежуточных измерительных преобразователей сверхвысокочастотных влагомеров для непрерывного контроля влажности сельскохозяйственных продуктов в технологических процессах их производства.

Диэлектрические свойства этих материалов и предъявляемые технологические требования диктуют необходимость применения сверхвысокочастотных методов и приборов контроля, метрологические характеристики которых в значительной степени зависят от выбранных первичных и промежуточных измерительных преобразователей.

Дан подробный анализ промежуточных измерительных преобразователей на основе автодина применительно к сверхвысокочастотной влагометрии. Определены области применения автодинных преобразователей в зависимости от решаемых задач. Приведены основные характеристики данного типа преобразователей: динамический диапазон и температурная погрешность измерения.

## Введение

Современные технологии производства, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции требуют все более точного контроля ее качества. Одним из важнейших показателей, подлежащих обязательному контролю, является влажность. В настоящее время наиболее перспективными для сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности являются сверхвысокочастотные (СВЧ) влагомеры, серийный выпуск, техническое обслуживание и ремонт, а также вопросы метрологического обеспечения которых освоены предприятиями Республики Беларусь. Метрологические характеристики отечественных СВЧ-влагомеров серии «Микро-радар» существенно превосходят аналогичные параметры традиционных емкостных приборов контроля влажности. В то время как последние практически достигли пределов своих возможностей в плане дальнейшего повышения точности измерений, сверхвысокочастотные влагомеры имеют еще большие перспективы развития. Они основаны на хорошо разработанной теории, объясняющей преимущества СВЧ-диапазона электромагнитных волн для целей влагометрии, а также на большом (свыше тридцать лет) опыте разработки и практического применения приборов данного типа в условиях большого прогресса в развитии электронной СВЧ — и микропроцессорной техники. Повышение точности измерений влажности на СВЧ в настоящее время идет в направлении совершенствования важнейших функциональных узлов влагомеров.

Значительную долю в общей погрешности СВЧ-влагомеров составляют погрешности, вносимые промежуточными измерительными преобразователями (ПРИП). Наибольшее распространение в СВЧ-влаго-

мерии получили:

- ПРИП на основе видеодетектирования;
- ПРИП компенсационного типа;
- автодинные измерительные преобразователи;
- ПРИП на основе автодинного смесителя частоты.

Рассмотрим основные метрологические характеристики промежуточных измерительных преобразователей на основе автодина.

## Основная часть

Структурная схема СВЧ-влагомера, использующего автодинный принцип приема сигнала, представлена на рис. 1. Схема работает следующим образом:

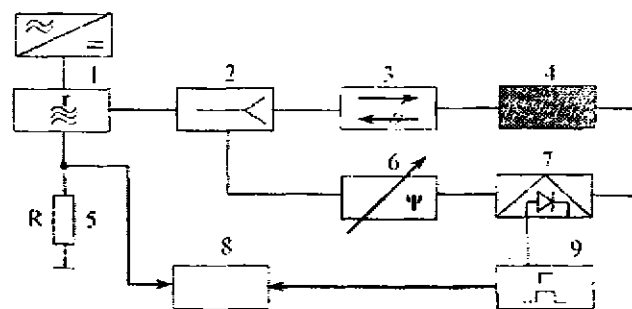


Рис. 1. Структурная схема СВЧ-измерителя влажности с использованием автодинного измерительного преобразователя: 1 — генератор СВЧ на диоде Ганна; 2 — делитель мощности (направленный ответитель); 3 — ферритовый волновод; 4 — первичный измерительный преобразователь, заполненный влажным материалом; 5 — резистор; 6 — фазовращатель; 7 — полупроводниковый модулятор СВЧ; 8 — устройство формирования сигнала и измеритель напряжения; 9 — генератор прямоугольных импульсов

СВЧ-мощность генератора на диоде Ганна (ГДГ) 1, проходя через ферритовый вентиль 3, поглощается во влажном материале, помещённом в первичный измерительный преобразователь 4. Величина поглощаемой мощности пропорциональна затуханию во влажном материале. Ослабленный по мощности СВЧ-сигнал модулируется периодической последовательностью импульсов с помощью полупроводникового  $p-i-n$  модулятора 7, управляемого от генератора прямоугольных импульсов 9. Модулированный СВЧ-сигнал через фазовращатель 6 и направленный ответвитель 2 поступает на выход ГДГ. Величина возвращаемой к ГДГ СВЧ-мощности зависит от затухания и фазового сдвига цепи внешней обратной связи (ВОС). Информация о величине затухания в цепи ВОС содержится в амплитуде напряжения импульсов, выделяющейся на резисторе  $R$ , который включён в цепь питания ГДГ по постоянному току. В данной схеме ГДГ 1 и резистор 5 обеспечивают детектирование и выделение напряжения импульсов, величина которого пропорциональна затуханию во влажном материале, т.е. здесь реализуется автодинамичный принцип приёма сигнала [1-3].

Отметим, что применение импульсной модуляции СВЧ-сигнала обеспечивает более надёжную регистрацию слабых сигналов измерителем напряжения.

Получим соотношения, связывающие изменение постоянной составляющей тока ДГ или падения напряжения на резисторе  $R$ , с затуханием во влажном материале и фазовым набегом в цепи ВОС. Исходя из принципа работы автодинамичного СВЧ-клаомера, генератор на ДГ работает на несогласованную нагрузку, изменение параметров которой приводит к изменению выходной мощности, высокочастотного напряжения и постоянной составляющей тока генератора СВЧ.

Запишем уравнение баланса активных проводимостей ГДГ, работающего на согласованную нагрузку в виде:

$$G_{HO} - G_c(U_m, U_0) + G_p(\omega) = 0, \quad (1)$$

где  $G_{HO}$  — активная проводимость согласованной нагрузки;

$G_c(U_m, U_0)$  — средняя по первой гармонике активная проводимость ДГ, зависящая от высокочастотного напряжения  $U_m$  и постоянного напряжения смещения на ДГ  $U_0$ ;

$G_p(\omega)$  — проводимость колебательной системы генератора, в общем случае, зависящая от частоты  $\omega$ . В дальнейшем будем полагать, что  $G_p(\omega) = G_p = const$ , т.е. проводимость колебательной системы при малых изменениях генерируемой частоты постоянна.

Пусть при изменении активной проводимости нагрузки  $G_{HO}$  на величину  $\Delta G_H$ , амплитуда высокочастотного напряжения  $U_m$  получит приращение  $\Delta U_m$ , а проводимость  $G_c$  — приращение  $\Delta G_c$ .

Из (1) находим:

$$-\Delta G_c = \Delta G_H. \quad (2)$$

Здесь приращение активной составляющей ДГ по первой гармонике высокочастотного тока равно:

$$\Delta G_c = \Delta G_c \Delta U_m + \frac{G_c}{2} (\Delta U_m)^2, \quad (3)$$

$$\text{где } G_c = \frac{\partial G_c(U_m, U_0)}{\partial U_m},$$

$$U_m = U_{mo}; \quad G_c = \frac{\partial^2 G_c(U_m, U_0)}{\partial U_m^2} U_m = U_{mo}.$$

Здесь  $U_{mo}$  — амплитуда высокочастотного напряжения при согласованной нагрузке.

Из (2) с учётом (3) получим квадратное уравнение:

$$\Delta U_m^2 + 2 \frac{G_c}{G_c} \Delta U_m + 2 \frac{\Delta G_H}{G_c} = 0, \text{ его решение даёт}$$

соотношение для приращения амплитуды высокочастотного напряжения в виде:

$$\Delta U_m = -\frac{G_c}{G_c} + \sqrt{\left(\frac{G_c}{G_c}\right)^2 - 2 \frac{\Delta G_H}{G_c}}. \quad (4)$$

Знак плюс в выражении (4) принят исходя из условия равенства нулю приращения амплитуды высокочастотного напряжения  $\Delta U_m$  при  $\Delta G_H = 0$ .

Учитывая [3], что для ДГ  $\frac{2\Delta G_H G_c}{G_c^2} \ll 1$ , раскладываем

второе слагаемое из (4) в ряд до величин второго порядка малости включительно:

$$\Delta U_m \approx -\frac{\Delta G_H}{G_c} \left( 1 + \frac{G_c}{2G_c} \Delta G_H \right). \quad (5)$$

Относительное изменение постоянной составляющей тока  $\Delta i_c$  генератора СВЧ за счёт изменения нагрузки диода Ганна обычно составляет величину  $\leq 0,1$ . Следовательно, для приращения постоянной составляющей тока можно записать:

$$\Delta i_c = \frac{di_c}{dU_m} \Delta U_m \Big|_{U_m = U_{mo}}. \quad (6)$$

После подстановки в (5) выражения (6) получим:

$$\Delta i_c = -\frac{di_c}{dU_m} \left( 1 + \frac{G_c}{2(G_c)^2} \Delta G_H \right) \frac{\Delta G_H}{G_c}. \quad (7)$$

Активная составляющая проводимости нагрузки ГДГ, выраженная через модуль  $\Gamma$  и фазу  $\psi$  коэффициента передачи цепи обратной связи, имеет вид [3]

$$G_H = \frac{G_{HO} (1 - |S_{12}|^2)}{1 + |S_{12}|^2 + 2|S_{12}| \cos \psi},$$

откуда приращение проводимости нагрузки

$$\Delta G_H = G_H - G_{HO} = \frac{-2|S_{12}|G_{HO} [|S_{12}| + \cos \psi]}{1 + |S_{12}|^2 + 2|S_{12}| \cos \psi}.$$

Модуль коэффициента передачи цепи ВОС

$|S_{12}| = \sqrt{\frac{P_{\text{от}}}{P_{\text{вх}}}} = \frac{U_{\text{от}}}{U_m}$  характеризует потери мощности в её элементах, в том числе во влажном материале.

Связь коэффициента передачи  $|S_{12}|$  с затуханием во влажном материале, выраженным в децибелах, определяется равенством:

$$N = 8.686 \ln |S_{12}|.$$

Величины производных  $\frac{\partial i_0}{\partial U_m}$ ,  $\frac{\partial G_e}{\partial U_m}$  и  $\frac{\partial^2 G_e}{\partial U_m^2}$  определяются соответственно из выражений для постоянной составляющей тока [3, 4].

$$i_0 = i_{kp} e^{1-Z_0} [Z_0 B_0(Z_1) - Z_1 B_1(Z_1)] + i_{kp} \beta Z_0.$$

и активной составляющей проводимости ДГ по первой гармонике тока

$$G_e = g_{kp} \left[ 2e^{1-Z_0} \left( B_0(Z_1) - (1+Z_0) \frac{B_1(Z_1)}{Z_1} \right) - \beta \right], \quad (9)$$

где  $Z_0 = \frac{U_0}{U_{kp}}$ ;  $Z_1 = \frac{U_m}{U_{kp}}$ ;  $g_{kp} = \frac{i_{kp}}{U_{kp}}$ ;

$U_0$  — постоянное напряжение на ДГ;

$\beta$  — коэффициент, характеризующий потери в ДГ;

$B_0(Z)$ ,  $B_1|Z|$  — функция Бесселя от мнимого аргумента первого рода нулевого и первого порядков.

На рис. 2 представлена вольтамперная характеристика ДГ.

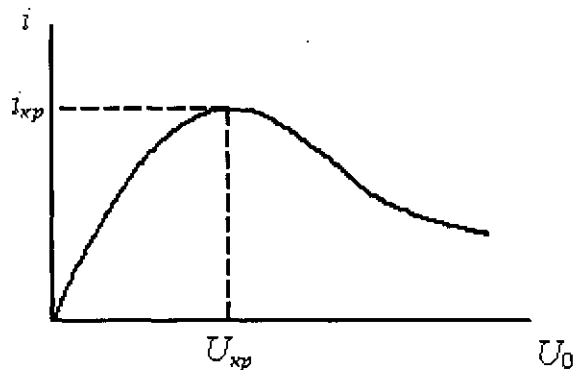


Рис. 2. Вольтамперная характеристика диода Ганна

На рис. 3 приведены результаты расчёта нормированного приращения постоянной составляющей тока, протекающего через ДГ и резистор R в цепи его питания, в зависимости от затухания во влажном материале N при значениях фазы в цепи ВОС  $\psi = 0$  и  $\psi = \pi$ .

В результате вычислений находим:

$$\frac{\partial i_0}{\partial U_m} = g_{kp} e^{1-Z_0} [Z_0 B_0(Z_1) - Z_1 B_1(Z_1)], \quad (10)$$

$$G_e = \frac{2g_{kp}}{U_{kp}} e^{1-Z_0}$$

$$\cdot \left[ B_0(Z_1) \left[ 1 + \frac{2(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] - \frac{1+Z_0}{Z_1} B_1(Z_1) \right] \quad (11)$$

$$G_e = \frac{2g_{kp} \exp(1-Z_0)}{U_{kp}^2}$$

$$\cdot \left\{ \left[ B_0(Z_1) \left[ 1 + \frac{3(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] \right] - \frac{B_1(Z_1)}{Z_1} \left[ 2+Z_0 + \frac{6(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] \right\}. \quad (12)$$

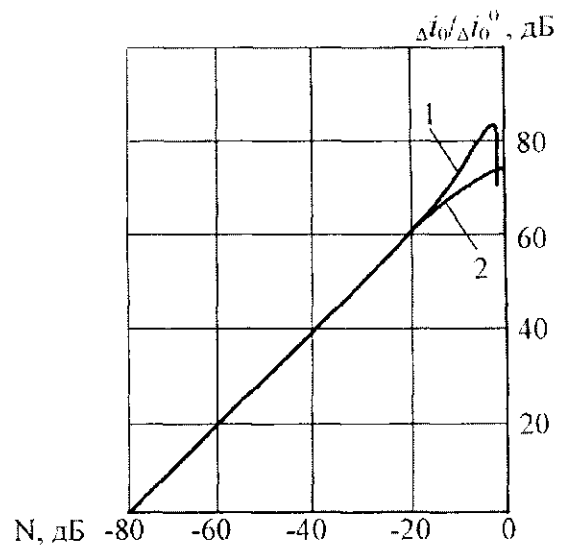


Рис. 3. Зависимость нормированного приращения постоянного тока генератора от затухания во влажном материале: при 1 —  $\psi = \pi$ , 2 —  $\psi = 0$

Нормировка текущего значения приращения постоянного тока произведена по приращению тока  $\Delta i_0^0$ , соответствующему затуханию  $N^0 = -80$  дБ.

По экспериментальной вольтамперной характеристике ДГ найдены значения  $i_{kp} = 0,36$  А,  $U_{kp} = 3,6$  В,  $g_{kp} = 0,10$  м<sup>-1</sup>. Согласованной нагрузке соответствует проводимость  $G_{HO} = 4 \cdot 10^{-3}$  Ом<sup>-1</sup>. Напряжение источника питания  $U_0 = 9$  В. Оптимальными с точки зрения выходной мощности нормированные величины  $Z_0$  и  $Z_1$  являются:  $Z_0 = 2...3$ ,  $Z_1 = 2,5...3,5$  [2,5]. При расчёте принимаем  $Z_0 = Z_1 = 2,5$ .

Из приведённых графиков (рис. 3, 4) видно, что линейная зависимость приращения постоянной со-

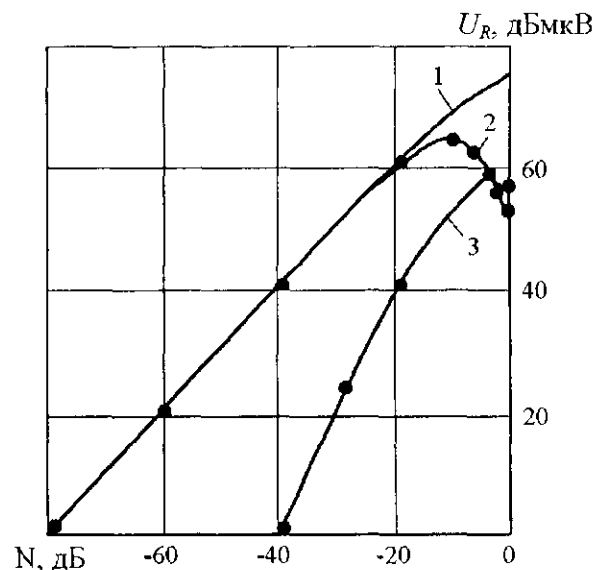


Рис. 4. Экспериментальные зависимости напряжения на нагрузке автодинного измерительного преобразователя от затухания во влажном материале: при 1 —  $\psi = \pi$ , 2 —  $\psi = 0$ , 3 —  $\psi = \pi/2$

ставляющей тока от затухания влажного образца для  $\psi = 0$  и  $\psi = \pi$  сохраняется до  $N = -20 \text{ дБ}$ .

Отметим, что при  $\psi = \pi/2$  динамический диапазон линейного участка значительно уменьшается. Действительно, из (7) с учётом (8) получим для приращения постоянной составляющей тока ДГ следующее равенство:

$$\Delta i_0 = 2 \frac{di_0}{dU_m} \left( 1 - \frac{G_e \cdot G_{HO} |S_{12}|^2}{G_e (1 + |S_{12}|^2)} \right) \frac{G_{HO} |S_{12}|^2}{G_e (1 + |S_{12}|^2)}. \quad (13)$$

Из (13) вытекает квадратичная зависимость  $\Delta i_0$  от модуля коэффициента передачи  $|S_{12}|$  ВОС. Это обуславливает при  $|S_{12}| \ll 1$  более быстрый (в 2 раза) спад функции  $\ln \frac{\Delta i_0}{\Delta i_0^0}$  в зависимости от  $N$ .

Результаты измерения напряжения на нагрузке автодина (сопротивление  $R$  в цепи питания ГДГ), обусловленного изменением постоянной составляющей тока, приведены на рис. 4, откуда следует, что результаты расчёта (рис. 3) эксперимента находятся в удовлетворительном соответствии.

#### Заключение

Таким образом, основные метрологические характеристики промежуточного измерительного преобразо-

вателя на основе автодина следующие:

- динамический диапазон - 85 - 90 дБ;
- температурная погрешность -  $9.1 \cdot 10^{-2}$  дБ/°С.

По сравнению с промежуточными измерительными преобразователями на основе видеодетектирования они имеют больший динамический диапазон при большей чувствительности к изменению температуры [6]. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании СВЧ-влажномеров для конкретных технологических процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бензарь, В.К. Техника СВЧ-влажнометрии. - Мн.: Высшая школа, 1974. - 352 с.
- 2 Милованов, О.С. Техника сверхвысоких частот/ О.С. Милованов, Н.П. Собенин. - М.: Атомиздат, 1980. - 463 с.
- 3 Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1972. - 252 с.
- 4 Каценеленбаум, Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. - М.: Наука, 1966. - 373 с.
- 5 Ковалев, Н.С. Теория и расчет полосковых волноводов. - М.: Наука и техника, 1967. - 282 с.
- 6 Минаев, М.Н. Устройство для определения влажности. М.Н. Минаев, Б.Л. Ценципер, В.А. Дайнеко, Н.Н. Ренгарт/ а.с. СССР №1532855.

УДК 621.43.001.4

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.05. 2006

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБКАТОЧНО - ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

В.Я. Тимошенко, канд. техн. наук, В.Н. Кецко, Д.А. Жданко, инженеры (УО БГАТУ);  
Н.И. Ермаков, директор (ОАО «Гомельский МРЗ»)

#### Аннотация

*Рассмотрена возможность замены дорогостоящих электротормозных установок техническими устройствами, использующими дроссель-эффект Джоуля-Томпсона. Авторами статьи предлагается использование регулируемого аксиально-плунжерного гидронасоса с дросселем постоянного сечения. Степень нагрузки при торможении агрегатов оценивается по давлению рабочей жидкости.*

#### Введение

В системе экспериментальной доводки и оценки качества ДВС (двигателей внутреннего сгорания) опытных и серийных тракторов, а также отремонтированной техники важная роль отводится стендовым испытаниям.

Стендовое оборудование должно обеспечивать:

- имитацию с достаточной точностью процессов и режимов работы реального двигателя;
- высокую степень повторного воспроизведения исследуемых режимов работы;
- испытания и доводку отдельных конструктивных элементов, влияющих на мощность и экономичность ДВС;

- минимальные затраты времени и издержки на проведение эксперимента.

#### Основная часть

Для обкатки и испытаний ДВС на заводах-изготовителях и ремонтных предприятиях широкое применение нашли обкаточно-тормозные электрические стенды, в которых для имитации загрузки двигателя с.-х. машины смонтирована балансирующая электромашина. Она представляет собой асинхронный трехфазный двигатель с фазным ротором и служит приводом при холодной обкатке ДВС и тормозом при обкатке на газу и испытаниях ДВС.