

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДИОДНО-ЕМКОСТНОГО МОСТА ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРОВОДИМОСТИ

Половинка Д.В., к.т.н., Невзлин Б.И., к.т.н., доц.  
Восточноукраинский национальный университет имени В.Даля  
Украина, 91034, Луганск, кв.Молодежный, 20А, ВНУ, кафедра электромеханики  
тел. (0642) 41-80-02, E-mail: bnevz@snu.edu.ua

Загирняк М.В., д.т.н., проф.  
Кременчугский государственный политехнический университет  
Украина, 39614, Кременчуг, ул.Первомайская, 20, КГПУ, кафедра электротехники  
тел. (05366) 3-62-19, E-mail: mzagirn@polytech.poltava.ua

*Запропоновані еквівалентні схеми діодно-ємнісних мостів, які використовуються для виділення активної і реактивної складових провідності вимірювального перетворювача з вологим сипучим матеріалом. Отримані аналітичні залежності на виході мостів від параметрів перетворювача, які дозволяють визначити шукану вологість сипучого матеріалу.*

*Предложены эквивалентные схемы диодно-емкостных мостов, используемых для выделения активной и реактивной составляющих проводимости измерительного преобразователя с влажным сыпучим материалом. Получены аналитические зависимости напряжения на выходе мостов от параметров преобразователя, позволяющие определять искомую влажность сыпучего материала.*

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности контроля влажности сыпучих материалов (СМ) высокочастотным методом требует раздельного измерения активной и реактивной проводимостей материала. Использование различного рода математических моделей электрофизических свойств частицы материала, а именно сферических, эллиптических и др., например, как показано на рис. 1, позволяет значительно снизить влияние факторов, имеющих слабую корреляцию с влажностью, но оказывающих существенное влияние на показания прибора контроля.

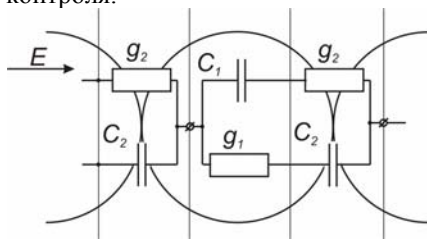


Рис. 1. Схема замещения частицы сыпучего материала:  
 $g_1, g_2$  – активная проводимость зоны проводимости и зоны контакта;  $C_1, C_2$  – емкости зон проводимости и контакта

Измерение активной и реактивной проводимостей контролируемого СМ производится с использованием диодно-емкостных мостов (ДЕМ), приведенных на рис. 2 и рис. 3.

Принцип действия этих мостов описан в работах [1, 2].

Точность измерений при контроле влажности сыпучих материалов является одним из важнейших параметров, так как при этом определяется не только количество влаги в материале, но и его качество, что влияет на стоимость контролируемой продукции.

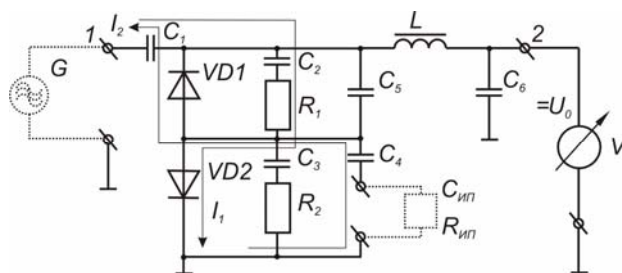


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема диодно-емкостного моста с выделением активной составляющей преобразователя

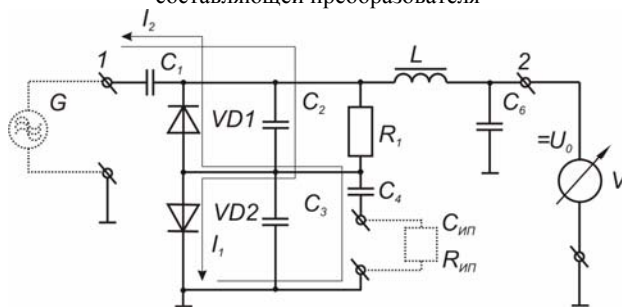


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема диодно-емкостного моста с выделением реактивной проводимости преобразователя

### 1. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*1.1. Выделение активной составляющей проводимости преобразователя.*

В схемах (рис. 2 и 3) имеются нелинейные элементы – диоды  $VD_1, VD_2$ , что вызывает затруднение при выведении аналитической формулы выходного напряжения.

Для замены нелинейных элементов линейными необходимо на основе принципа действия ДЕМ составить эквивалентную схему моста, заменив диоды при подаче на них прямого напряжения коротким замыканием, а при подаче обратного считать, что на их месте разрыв цепи.

Поскольку на мост поступает высокочастотное (ВЧ) синусоидальное напряжение, показанное на рис. 4, через разделительный конденсатор  $C_1$ , то схему целесообразно рассматривать отдельно для положительного и отрицательного полупериодов.

При выделении активной составляющей сигнала необходимо рассматривать схему (рис. 2). При поступлении на этот мост положительной полуволны синусоидального напряжения ток  $I_1$  потечет через разделительные конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ , эталонный конденсатор  $C_5$ , сопротивление  $R_1$  и диод  $VD_2$ . Прямое сопротивление диодов можно считать равным нулю, а обратное – бесконечности, поэтому при положительном полупериоде ток  $I_1$  не протекает через измерительный преобразователь (ИП) и измерительное плечо из-за шунтирования их диодом.

При поступлении на мост отрицательной полуволны синусоидального напряжения ток  $I_2$  потечет через разделительные конденсаторы  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ , сопротивление  $R_2$ , ИП с параметрами  $C_{ИП}$ ,  $R_{ИП}$  и диод  $VD_1$ , как показано на рис. 2.

Тогда эквивалентная схема для положительной полуволны примет вид, как на рис. 5.

Поскольку  $LC$ -фильтр при параметрах  $L = 200 \cdot 10^{-6}$  Гн и  $C_6 = 50 \cdot 10^{-9}$  Ф для ВЧ ( $f = 5$  МГц) напряжения имеет очень большое индуктивное сопротивление  $X_L = 6280$  Ом и малое емкостное сопротивление  $X_{C6} = 0,637$  Ом, то в схеме этими параметрами можно пренебречь. Соответствующая эквивалентная схема приведена на рис. 6.

С учетом этого полное сопротивление данной схемы можно определить как:

$$\dot{Z}_1 = \dot{X}_{C1} + \left[ \left( R_1 + \dot{X}_{C2} \right)^{-1} + \dot{X}_{C5} \right]^{-1} \quad (1)$$

или

$$\dot{Z}_1 = (-k \cdot C_1)^{-1} + \left[ \left( R_1 - (k \cdot C_2)^{-1} \right)^{-1} - k \cdot C_5 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $k = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ .

Формула для определения тока:

$$i_1 = U(\dot{Z}_1)^{-1} = U \cdot \left[ (-k \cdot C_1)^{-1} + \left[ \left( R_1 - (k \cdot C_2)^{-1} \right)^{-1} - k \cdot C_5 \right]^{-1} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $U = U_m / (2 \cdot \sqrt{2})$  - половина действующего значе-

ния напряжения питания. Половина напряжения подставляется в эту формулу, потому что отрицательная полуволна напряжения шунтируется диодом для эталонного плеча, и форма напряжения будет иметь вид, показанный на рис. 7.

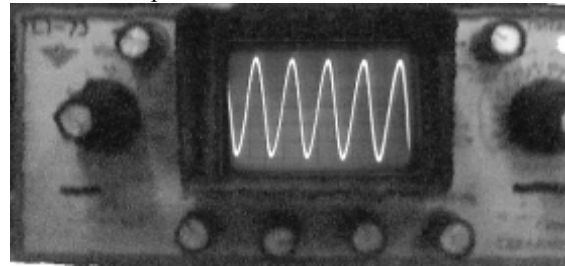


Рис. 4. Форма питающего напряжения ДЕМ, снятая на осциллографе С1-73

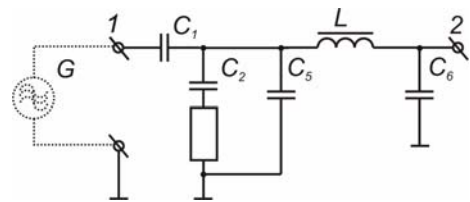


Рис. 5. Эквивалентная схема ДЕМ с фильтром для положительного полупериода ВЧ напряжения при выделении активной составляющей

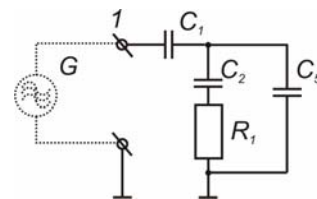


Рис. 6. Эквивалентная схема ДЕМ без фильтра для положительного полупериода ВЧ напряжения при выделении активной составляющей

Рассуждая аналогично, получаем эквивалентную схему для отрицательной полуволны (рис. 8).

Как и для положительного полупериода, пренебрегаем сопротивлением  $LC$ -фильтра. Тогда эквивалентная схема примет вид (рис. 9).

Полное сопротивление данной схемы

$$\dot{Z}_2 = \dot{X}_{C1} + \left[ \left[ \left( R_{СИП} \right)^{-1} + \left( \dot{X}_{СИП} \right)^{-1} \right]^{-1} + \left[ \left( R_1 + \dot{X}_{C3} \right)^{-1} + \dot{X}_{C4} \right]^{-1} \right]^{-1} \quad (4)$$

или

$$\dot{Z}_2 = (-k \cdot C_1)^{-1} + \left[ \left[ \left( R_{ИП} \right)^{-1} - k \cdot C_{ИП} \right]^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} \right]^{-1} + \left[ \left( R_1 - (k \cdot C_3)^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (5)$$

и ток

$$i_2 = U \left( \dot{Z}_2 \right)^{-1} = U \cdot \left( (-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{\text{ИП}})^{-1} - k \cdot C_{\text{ИП}} \right)^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} \right)^{-1} + \left( R_1 - (k \cdot C_3)^{-1} \right)^{-1} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $U = U_m / 2 \cdot \sqrt{2}$  - половина действующего значения напряжения питания. Половина напряжения подставляется в эту формулу, потому что положительная полуволна напряжения шунтируется диодом для измерительного плеча, и форма напряжения будет иметь вид, показанный на рис. 10.

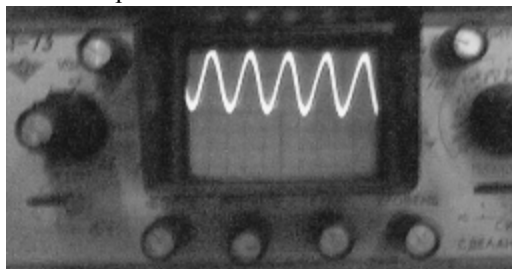


Рис. 7. Форма напряжения на измерительном плече ДЕМ, снятая на осциллографе С1-73

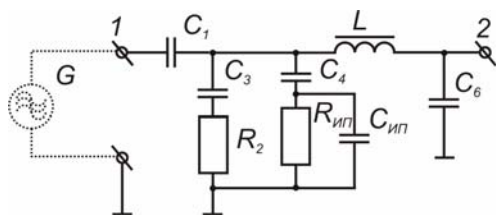


Рис. 8. Эквивалентная схема ДЕМ с фильтром для отрицательного полупериода ВЧ напряжения при выделении активной составляющей

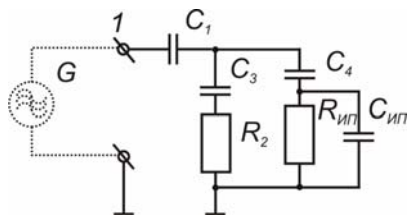


Рис. 9. Эквивалентная схема ДЕМ без фильтра для отрицательного полупериода ВЧ напряжения при выделении активной составляющей

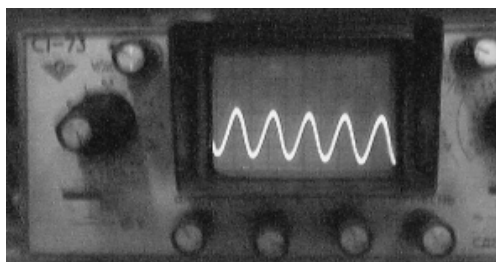


Рис. 10. Форма напряжения на эталонном плече ДЕМ, снятая на осциллографе С1-73

Особенностью работы ДЕМ является то, что на выходе LC - фильтра формируется постоянное на-

пряжение, пропорциональное значению активной проводимости ИП. Это напряжение пропорционально разности токов  $I_1$  и  $I_2$ , и может быть определено

$$\text{как: } \dot{U}_{\text{ВЫХ}} = (I_1 - I_2) \cdot \dot{Z}_2 = \left( \frac{U}{\dot{Z}_2} - \frac{U}{\dot{Z}_1} \right) \cdot \dot{Z}_2 = U \cdot \left( 1 - \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} \right)$$

(7)  
или

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = U \cdot \left[ 1 - \frac{- (k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{\text{ИП}})^{-1} - k \cdot C_{\text{ИП}} \right)^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} \right)^{-1} + \left( R_1 - (k \cdot C_3)^{-1} \right)^{-1}}{(-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_1 - (k \cdot C_2)^{-1})^{-1} - k \cdot C_5 \right)^{-1} \right)} \right] \rightarrow \quad (8)$$

Постоянной составляющей, которая образуется в обоих плечах моста (рис. 8, 9), можно пренебречь при расчетах выходного напряжения ДЕМ. Так как значение постоянной составляющей для обоих плеч моста одинаково, то согласно (7), они вычитаются друг из друга и никакого влияния на выходное напряжение не оказывают.

Если производить вычисления по указанной формуле, то результат будет комплексным, а постоянная составляющая не может быть комплексной величиной. Поэтому необходимо выделить из формулы реальную часть

$$U_{\text{ВЫХ}} = \text{Re} \left[ U \cdot \left[ 1 - \frac{- (k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{\text{ИП}})^{-1} - k C_{\text{ИП}} \right)^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} \right)^{-1} + \left( R_1 - (k \cdot C_3)^{-1} \right)^{-1}}{(-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_1 - (k \cdot C_2)^{-1})^{-1} - k \cdot C_5 \right)^{-1} \right)} \right] \right] \rightarrow \quad (9)$$

### 1.2. Выделение реактивной составляющей проводимости преобразователя

При выделении реактивной составляющей сигнала необходимо рассматривать схему, рис. 3. При поступлении на мост положительной полуволны синусоидального напряжения ток  $I_1$  потечет через разделительные конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ , сопротивление  $R_1$  и диод  $VD_2$ , как показано на рис. 3, так же как и для ДЕМ с выделением активной составляющей. При этом принимаем те же допущения: прямое сопротивление диодов равно нулю, а обратное - бесконечности. Поэтому при положительном полупериоде ток  $I_1$  не протекает через ИП и измерительное плечо из-за шунтирования их диодом.

В случае поступления на мост отрицательной

половольны синусоидального напряжения ток  $I_2$  потечет через разделительные конденсаторы  $C_1, C_3, C_4$ , сопротивление  $R_{ИП}$  и емкость  $C_{ИП}$  ИП, и диод  $VD_1$ , как показано на рис. 3.

Учитывая принятые допущения, эквивалентная схема для положительной полуволны примет вид, показанный на рис. 11.

Так как  $LC$ -фильтр при параметрах  $L = 200 \cdot 10^{-6}$  Гн и  $C_6 = 50 \cdot 10^{-9}$  Ф для ВЧ ( $f = 5$ ) МГц напряжения имеет очень большое индуктивное сопротивление  $X_L = 6280$  Ом и малое емкостное сопротивление  $X_{C6} = 0,637$  Ом, то в схеме этими параметрами можно пренебречь. Тогда эквивалентную схему можно представить в виде, как на рис. 12.

Полное сопротивление данной схемы [3]

$$\dot{Z}_1 = \dot{X}_{C1} + \left( \left( \dot{X}_{C2} \right)^{-1} + (R_1)^{-1} \right)^{-1} \quad (10)$$

или

$$\dot{Z}_1 = (-k \cdot C_1)^{-1} + (-k \cdot C_2 + (R_1)^{-1})^{-1}, \quad (11)$$

и ток

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= U \left( \dot{Z}_1 \right)^{-1} = \\ &= U \cdot \left( (-k \cdot C_1)^{-1} + (k \cdot C_2 - (R_1)^{-1})^{-1} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогично предыдущему, эквивалентная схема для отрицательной полуволны будет иметь вид, показанный на рис. 13.

Как и для положительного полупериода пренебрегаем сопротивлением  $LC$ -фильтра. Тогда эквивалентная схема примет вид (рис. 14).

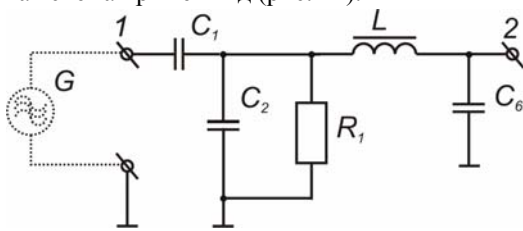


Рис. 11. Эквивалентная схема ДЕМ с фильтром для положительного полупериода ВЧ напряжения при выделении емкостной составляющей

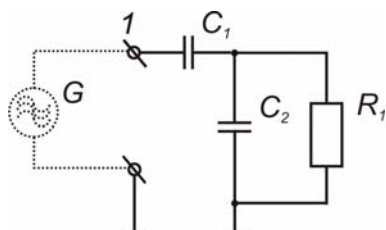


Рис. 12. Эквивалентная схема ДЕМ без фильтра для положительного полупериода ВЧ напряжения при выделении емкостной составляющей

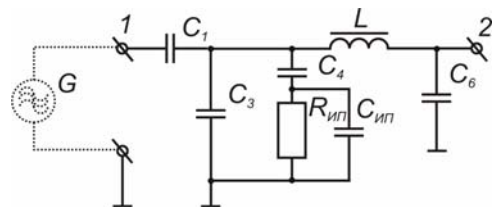


Рис. 13. Эквивалентная схема ДЕМ для отрицательного полупериода ВЧ напряжения при выделении емкостной составляющей

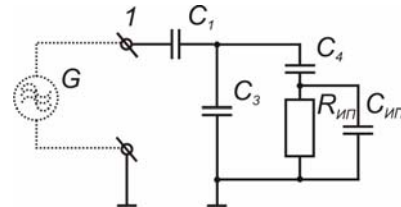


Рис. 14. Эквивалентная схема ДЕМ для отрицательного полупериода ВЧ напряжения без фильтра при выделении емкостной составляющей

Полное сопротивление данной схемы [3]

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= \dot{X}_{C1} + \left( \left( (R_{ИП})^{-1} + \left( \dot{X}_{ИП} \right)^{-1} \right)^{-1} + \right. \\ &\quad \left. + \dot{X}_{C4} \right)^{-1} + \left( \dot{X}_{C3} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= (-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{ИП})^{-1} - k \cdot C_{ИП} \right)^{-1} - \right. \\ &\quad \left. - (k \cdot C_4)^{-1} - k \cdot C_3 \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (14)$$

и ток

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= U \left( \dot{Z}_2 \right)^{-1} = U \left( (-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{ИП})^{-1} - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - k \cdot C_{ИП} \right)^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} - k \cdot C_3 \right)^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

как и для ДЕМ с выделением активной составляющей. В мосте на выходе  $LC$ -фильтра формируется постоянное напряжение, пропорциональное проводимости ИП, причем в основном реактивной. Это напряжение пропорционально разности токов  $I_1$  и  $I_2$ , и может быть определено как:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) \cdot \dot{Z}_2 = \left( \frac{U}{\dot{Z}_2} - \frac{U}{\dot{Z}_1} \right) \cdot \dot{Z}_2 = U \cdot \left( 1 - \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} \right) \quad (16)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вых}} &= U \cdot \left( 1 - \frac{(-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \left( (R_{ИП})^{-1} - \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - k \cdot C_{ИП} \right)^{-1} - (k \cdot C_4)^{-1} - k \cdot C_3 \right)^{-1}}{(-k \cdot C_1)^{-1} + \left( k \cdot C_2 - (R_1)^{-1} \right)^{-1}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Так же, как и для моста с выделением активной

составляющей, при вычислении выходного напряжения результат будет комплексным, поэтому необходимо выделить из формулы реальную часть:

$$U_{\text{вых}} = \operatorname{Re} \left[ U \cdot \left( 1 - \frac{(-k \cdot C_1)^{-1} + \left( \frac{1}{R_{\text{ИП}}} \right)^{-1}}{(-k \cdot C_1)^{-1} + \frac{-k \cdot C_{\text{ИП}})^{-1} - (k \cdot C_4 - 1)^{-1} - k \cdot C_3}{+(k \cdot C_2 - (R_1)^{-1})^{-1}}} \right) \right] \quad (18)$$

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

При параметрах схемы  $R_1 = R_2 = 43 \text{ Ом}$ ;  $f = 5,0 \text{ МГц}$ ;  $C_5 = 10 \text{ пФ}$ ;  $U_m = 13 \text{ В}$ ;  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_6 = 50 \text{ нФ}$  выходная характеристика будет иметь вид, приведенный на рис. 15, кривая 2.

Как видно из рис. 15, аналитическая и экспериментальная кривые имеют линейный характер, но не совпадают при одинаковых исходных данных. Это объясняется отклонением значений от номинальных элементов ДЕМ при проведении опыта и погрешностью измерительных приборов. Например, параметры активных сопротивлений плеч  $R_1$  и  $R_2$  при проведении опыта были равны  $43,8 \text{ Ом}$  и  $41,6 \text{ Ом}$ , соответственно, при одном и том же расчетном номинале для  $R_1$  и  $R_2 - 43 \text{ Ом}$ .

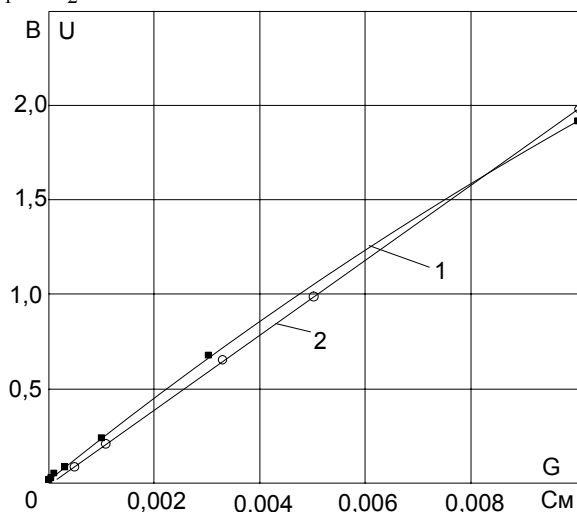


Рис. 15. Экспериментальная (1) и аналитическая (2) выходные характеристики ДЕМ при выделении активной составляющей  $G$  проводимости

При параметрах схемы  $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ;  $f = 5,0 \text{ МГц}$ ;  $U_m = 13 \text{ В}$ ;  $C_1 = C_4 = C_6 = 50 \text{ нФ}$ ;  $C_2 = C_3 = 780 \text{ пФ}$  выходная характеристика будет иметь вид, приведенный на рис. 15, кривая 2.

Здесь так же аналитическая и экспериментальная кривые имеют линейный характер, но не совпадают при одинаковых исходных данных по той же причине.

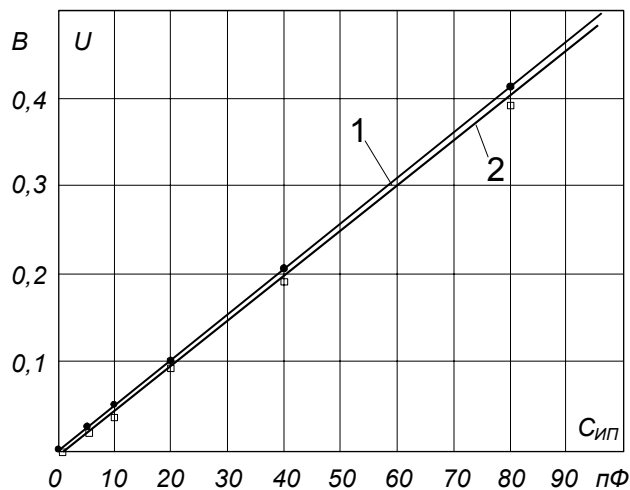


Рис. 16. Экспериментальная (1) и аналитическая (2) выходные характеристики ДЕМ при выделении емкостной составляющей  $C_{\text{ИП}}$  проводимости

## ВЫВОДЫ

1. Предложен способ получения аналитических зависимостей выходного напряжения от емкости и активной проводимости измерительного преобразователя.
2. Полученные аналитические зависимости совпадают с экспериментальными при незначительном отклонении (около 2,5%).
3. Система уравнений (9) и (18) позволяет решить обратную задачу – по выходным напряжениям мостов определить параметры преобразователя, а по ним искомую влажность сыпучего материала.
4. Поскольку в уравнениях (9) и (18) выделяется реальная часть, что приводит к усложнению алгоритма вычисления влажности сыпучего материала, во влагомерах необходимо использовать микроконтроллеры с развитой архитектурой и большим объемом программной памяти.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nevzlin B.I., Gorazdovskiy T.Ya., Dyachenko Yu.Yu., Polovinka D.V. The method of error decrease in measurement of conductance by the diode-capacitance bridge // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. – 1999. – №6 - С. 105-109.
- [2] Невзлин Б.И., Половинка Д.В., Дьяченко Ю.Ю. Разработка и исследование устройства для измерения емкостной и активной проводимости двухполюсника // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2002. – №1 - с. 42-51.
- [3] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1998г. – 800с.

Поступила 7.10.2005