

Изобретение относится к области влагометрии и может быть использовано для контроля влажности сыпучих материалов.

Известен также цифровой двухчастотный влагомер (прототип), содержащий генераторы низкой и высокой частот, которые соединены с первым и вторым входами автоматического переключателя соответственно, измерительный преобразователь, включающий образцовый конденсатор и емкостной датчик, последовательно соединенные аналого-цифровой преобразователь, микроЭВМ с панелью управления и цифровой индикатор. Кроме того, устройство содержит блок автоматической стабилизации амплитуды напряжения генераторов низкой и высокой частот на емкостном датчике, цифровой вольтметр и цифровой фазометр, соединенные с выходом измерительного преобразователя.

Погрешность статизма блока автоматической стабилизации амплитуды генераторов низкой и высокой частот, а также амплитудно-фазовая погрешность фазометра, обуславливают низкую чувствительность устройства в условиях, при которых информативный сигнал становится соизмеримым с флуктуациями, обусловленными суммарной погрешностью влагомера, например, при малых активных потерях в исследуемом материале или его малой влажности.

В основу изобретения поставлена задача создать цифровой двухчастотный влагомер, в котором введение новых узлов позволило бы обеспечить точность контроля влажности при работе как с чистыми диэлектрическими материалами, имеющими малые активные потери, так и с диэлектрическими материалами, имеющими высокие активные потери (сквозную проводимость).

Поставленная задача достигается тем, что цифровой двухчастотный влагомер, содержащий генераторы низкой и высокой частот, которые соединены с первым и вторым входами первого автоматического переключателя соответственно, измерительный преобразователь, включающий первый образцовый конденсатор и емкостной датчик, последовательно соединенные аналого-цифровой преобразователь, микроЭВМ с панелью управления и цифровой индикатор, согласно изобретению, снабжен переменным аттенуатором, последовательно соединенными множительным блоком, фильтром нижних частот и усилителем, вторым образцовым конденсатором, цифроаналоговым преобразователем и вторым автоматическим переключателем, включенным первым входом и выходом между емкостным датчиком и первым образцовым конденсатором соответственно, второй вход второго автоматического переключателя соединен с выходом второго образцового конденсатора, выход первого образцового конденсатора заземлен, входы множительного блока подключены к выходам второго автоматического переключателя и первого автоматического переключателя соответственно, к выходу последнего подключены также вход второго образцового конденсатора и вход емкостного датчика, переменный аттенуатор включен между генератором низкой частоты и первым входом первого автоматического переключателя, выход усилителя соединен со входом аналого-цифрового преобразователя, вход цифроаналогового преобразователя соединен со вторым выходом микроЭВМ с панелью управления, а выход - с управляющим входом переменного аттенуатора, третий и четвертый выходы микроЭВМ с панелью управления соединены с управляющими входами первого автоматического переключателя и второго автоматического переключателя соответственно.

Введение переменного аттенуатора, множительного блока, фильтра нижних частот, усилителя, второго образцового конденсатора, второго автоматического переключателя и цифроаналогового преобразователя, включенных указанным выше образом и воздействие их на емкостной датчик и образцовый конденсатор приводит к тому, что в результате перемножения сигналов низкой или высокой частот на входе и выходе измерительного преобразователя, а затем выделении постоянной составляющей этого сигнала, пропорциональной емкостному току измерительного преобразователя, исключается влияние активных потерь на результат измерения, а дальнейшее изменение амплитуды низкочастотного сигнала в соответствии с разницей коэффициентов передачи измерительного преобразователя на низкой и высокой частотах, измерение и вычисление относительной разности эффективных значений напряжений низкой и высокой частот на выходе множительного блока, отнесенной к низкочастотному значению, исключает влияние нестабильности генераторов низкой и высокой частот на результат измерения. Использование для измерений одного канала исключает влияние частотной погрешности блока перемножения, снижает влияние временной нестабильности коэффициентов передач множительного блока, фильтра нижних частот и аналого-цифрового преобразователя на результат измерения исключает необходимость выбора элементов с идентичными характеристиками, что позволяет обеспечить точность контроля влажности при работе как с чистыми диэлектрическими материалами, имеющими малые активные потери, так и с диэлектрическими материалами, имеющими высокие активные потери (сквозную проводимость).

На фиг. 1 показана блок-схема цифрового двухчастотного влагомера.

Устройство содержит генератор низкой частоты 1, генератор высокой частоты 2, автоматический переключатель 3, измерительный преобразователь 4, емкостной датчик 5, образцовый конденсатор 6, аналого-цифровой преобразователь 7, микроЭВМ 8 с панелью управления 9, цифровой индикатор 10, переменный аттенуатор 11, множительный блок 12, фильтр нижних частот 13, усилитель 14, второй образцовый конденсатор 15, цифро-аналоговый преобразователь 16 и второй автоматический переключатель 17.

Генератор низкой частоты 1 и генератор высокой частоты 2 соединены с первым и вторым входами автоматического переключателя 3 соответственно, выход аналого-цифрового преобразователя 7 соединен со входом микроЭВМ 8 с панелью управления 9, цифровой индикатор 10 подключен к выходу микроЭВМ, второй автоматический переключатель 17 включен первым входом и выходом к емкостному датчику 5 и образцовому конденсатору 6 соответственно, второй вход второго автоматического переключателя 17 соединен с выходом второго образцового конденсатора 15, выход первого образцового конденсатора 6 заземлен, входы множительного блока 12 подключены к выходам второго автоматического переключателя 17 и первого автоматического переключателя 3 соответственно, к выходу последнего подключены также вход второго образцового конденсатора 15 и вход емкостного датчика 5, переменный аттенуатор 11 включен между генератором низкой частоты 1 и первым входом первого автоматического переключателя 3, выход усилителя

14 соединен со входом аналого-цифрового преобразователя 7, вход цифроаналогового преобразователя 16 соединен со вторым выходом микроЭВМ с панелью управления 9, а выход - с управляющим входом переменного аттенюатора 11, третий и четвертый выходы микроЭВМ 8 с панелью управления 9 соединены с управляющими входами первого автоматического переключателя 3 и второго автоматического переключателя 17 соответственно.

Цифровой двухчастотный влагомер работает следующим образом.

По команде микроЭВМ, ко входу емкостного датчика 5 подключается генератор низкой частоты 1 (автоматический переключатель 3 в положении 1), а к выходу емкостного датчика - образцовый конденсатор 6 (автоматический переключатель 17 в положении 1). При этом, на измерительный преобразователь поступает низкочастотное напряжение частоты  $\omega_1$ , определяемое выражением:

$$U_1 = k_1 \cdot U_{m1} \cdot (1 + \gamma_1) \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1),$$

где  $U_{m1}$  - амплитуда низкочастотного напряжения;

$$\gamma_1 = \frac{\Delta U_{m1}}{U_{m1}}$$

- относительная нестабильность амплитуды генератора низкой частоты;

$k_1$  - коэффициент передачи аттенюатора 11.

На входы множительного блока поступают сигналы низкой частоты ал со входа и выхода измерительного преобразователя. Сигнал на входе измерительного преобразователя определяется выражением (1), а сигнал на выходе измерительного преобразователя (падение напряжения на образцовом конденсаторе 6), можно найти из выражения

$$U_3 = \frac{Y_1 \cdot U_1}{Y_2},$$

где  $Y_1$  - полная проводимость емкостного датчика 5 на низкой частоте  $\omega_1$ ,

$Y_2$  - проводимость первого образцового конденсатора 6 на низкой частоте.

Полная проводимость емкостного датчика 5 на низкой частоте определяется выражением:

$$Y_1 = k_2 \cdot \omega_1 \cdot \varepsilon_1^*(m_b, m_c, m_n),$$

где  $k_2$  - коэффициент пропорциональности, определяемый геометрическими размерами емкостного датчика 5;

$\varepsilon_1^*(m_b, m_c, m_n)$  - комплексная диэлектрическая, проницаемость, пропорциональная массе влаги  $m_b$ , массе сухого вещества  $m_c$  и массе проводящих веществ  $m_n$  в объеме емкостного датчика.

Образцовый конденсатор 6 выбирают таким, чтобы частотная дисперсия диэлектрической проницаемости его диэлектрика была малой на рабочих частотах. Для этого можно использовать конденсаторы, в которых в качестве диэлектрика используется слюда, дисперсия диэлектрической проницаемости которой до сверхвысоких частот мала. В этом случае ею можно пренебречь. Проводимость образцового конденсатора 6 на низкой частоте  $\omega_1$  определяется выражением

$$Y_2 = k_3 \cdot \omega_1 \cdot \varepsilon_2,$$

где  $k_3$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров первого образцового конденсатора 6;

$\varepsilon_2$  - диэлектрическая проницаемость его диэлектрика.

С учетом проводимостей емкостного датчика и первого образцового конденсатора, определяемых выражениями (3) и (4), падение низкочастотного напряжения на первом образцовом конденсаторе 6, будет равно

$$U_3 = \frac{k_1 \cdot U_{m1} (1 + \gamma_1) \cdot k_2 \cdot \varepsilon_1^*(m_b, m_c, m_n) \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \Delta \varphi_1)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (5)$$

где  $\Delta \varphi_1$  - фазовый сдвиг, определяемый соотношением реактивной и активной проводимости емкостного датчика на низкой частоте. Сигналы, определяемые выражением (1) и (5), поступают на входы множительного блока 12, напряжение на выходе которого равно:

$$U_4 = S \cdot (1 + \gamma_3) \cdot U_1 \cdot U_3 = S \cdot (1 + \gamma_3) \cdot x$$

где  $S$  - крутизна преобразования множительного блока 12;

$x$  - амплитудная погрешность множительного блока 12.

Сигнал, определяемый выражением (6), проходит через фильтр нижних частот и усилитель. На выходе усилителя он принимает вид:

$$x \cdot \frac{U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2 \cdot \varepsilon_1(m_b, m_c)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (6)$$

$$U_5 = \frac{S \cdot (1 + \gamma_3) \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) \cdot \varepsilon_1(m_b, m_c)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (7)$$

где  $k_4$ ,  $\gamma_4$  - коэффициент усиления усилителя и его погрешность, вызываемая нестабильностью параметров усилителя.

Напряжение  $U_5$  переводится в цифровой код в аналого-цифровом преобразователе 12 и поступает на вход микро-ЭВМ, где становится пропорциональным выражению:

$$U_5^1 = \frac{S \cdot (1 + \gamma_3) \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) (1 + \gamma_\Delta) \cdot \varepsilon_1(m_b, m_c)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (8)$$

где  $Y_A$  - методическая погрешность АЦП.

Затем, по команде микроЭВМ, переключатель 3 переводится в положение 2. Высокочастотный сигнал, который определяется выражением:

$$U_2 = U_{m2}(1 + \gamma_2) \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (9)$$

где  $U_{m2}$  - амплитуда высокочастотного напряжения;

$$\gamma_2 = \frac{\Delta U_{m2}}{U_{m2}}$$

относительная нестабильность амплитуды высокочастотного напряжения, поступает на вход измерительного преобразователя, на выходе которого имеем

$$U_6 \approx \frac{Y_3 \cdot U_2}{Y_4}, \quad (10)$$

где  $Y_3$  - полная проводимость емкостного датчика 5 на высокой частоте  $\omega_2$ ;

$Y_4$  - проводимость первого образцового конденсатора 6 на высокой частоте  $\omega_2$ .

Полная проводимость емкостного датчика на высокой частоте уменьшается за счет дисперсии диэлектрической проницаемости исследуемого материала, и определяется, в основном, массой сухого вещества, в соответствии с выражением:

$$Y_3 = k_2 \cdot \omega_2 \cdot \varepsilon_1^*(m_c, m_n), \quad (11)$$

где  $\varepsilon_1(m_c, m_n)$  - комплексная диэлектрическая проницаемость, пропорциональная массе сухого вещества  $m_c$  и массе проводящих веществ  $m_n$  в объеме емкостного датчика.

Проводимость первого образцового конденсатора 6 на высокой частоте определяется выражением

$$Y_4 = k_3 \cdot \omega_2 \cdot \varepsilon_2. \quad (12)$$

С учетом выражений (9), (11) и (12), падение высокочастотного напряжения (10) на выходе измерительного преобразователя имеет вид

$$U_6 = \frac{U_{m2} (1 + \gamma_2) \cdot k_2 \cdot \varepsilon_1^*(m_c, m_n) \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi_2)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (13)$$

где  $\Delta\varphi_2$  - фазовый сдвиг, определяемый соотношением реактивной и активной проводимостей емкостной датчика на высокой частоте.

Сигналы, определяемые выражениями (9) и (13) поступают на входы множительного блока 12, напряжение на выходе которого равно

$$U_7 = (S \cdot (1 + \gamma_s) \cdot U_2 \cdot U_6 = S \cdot (1 + \gamma_s) \cdot (1 + \gamma\omega_2) \times (U_{m2}^2(1 + \gamma_2)^2 - k_2 \cdot \varepsilon_1(m_c)) / k_3 \varepsilon_2 \quad (14)$$

где  $\gamma\omega_2$  - частотная погрешность множительного блока на частоте  $\omega_2$ .

Напряжение (14) проходит через фильтр нижних частот и усилитель. На выходе усилителя сигнал определяется выражением:

$$U_8 = \frac{S \cdot (1 + \gamma_s) \cdot (1 + \gamma\omega_2) \cdot U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \cdot k_2 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) \cdot \varepsilon_1(m_c)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (15)$$

Напряжение  $U_8$  в аналого-цифровом преобразователе 7 переводится в цифровой код и поступает на вход микроЭВМ, где принимает вид:

$$U_8' = \frac{S \cdot (1 + \gamma_s) \cdot (1 + \gamma\omega_2) \cdot U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \cdot k_2 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) (1 + \gamma\Delta) \cdot \varepsilon_1(m_c)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (16)$$

где  $\gamma\Delta$  - погрешность АЦП.

Следующий шаг программы проведения измерения состоит в вычислении цифрового кода разности напряжений, определяемых выражениями (8), и (16):

$$\begin{aligned} U_9 &= U_5 - U_8 = \\ &= \frac{S \cdot (1 + \gamma_s) \cdot k_2 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) (1 + \gamma\Delta)}{k_3 \cdot \varepsilon_2} \times \\ &\times [U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot \varepsilon_1(m_b, m_c) - \\ &- U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 (1 + \gamma\omega_2) \cdot \varepsilon_1(m_c)], \quad (17) \end{aligned}$$

и сведении этой разности к нулю. Для этого, цифровой код разности (17) выдается на цифроаналоговый преобразователь 16, который связан с переменным аттенуатором 11 низкочастотного генератора 1. При регулировке коэффициента передачи переменного аттенуатора, достигается условие равенства напряжений (8) и (16). При этом условии, коэффициент передачи  $k_1$  принимает вид

$$k_1 = \sqrt{\frac{U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 (1 + \gamma\omega_2) \varepsilon_1(m_c)}{U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot \varepsilon_1(m_b, m_c)}}. \quad (18)$$

Далее, по команде микроЭВМ, автоматический переключатель 17 устанавливается в положение 2, при котором к образцовому конденсатору 6 подключается второй образцовый конденсатор 15.

Емкость  $C_3$  второго образцового конденсатора 15 выбирается при градуировке влагомера из соотношения:

$$C_3 = \frac{C_{x \max} + C_{x \min}}{2}, \quad (19)$$

где  $C_{x \max}$ ,  $C_{x \min}$  - емкость емкостного датчика, соответствующая максимальной и минимальной влажности исследуемого материала, соответственно.

При этих условиях, амплитуды сигналов, поступающих на входы множительного блока 12,

соответствующие определенным положениям переключателей, будут приблизительно равны. Следовательно, будут равны и погрешности, вносимые множительным блоком и другими узлами схемы.

Проводимость второго образцового конденсатора на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определяется выражениями:

$$Y_5 = k_5 \cdot \omega_1 \cdot \varepsilon_3; \quad (20)$$

$$Y_6 = k_5 \cdot \omega_2 \cdot \varepsilon_3, \quad (21)$$

где  $k_5$  - коэффициент пропорциональности, определяемый геометрическими размерами второго образцового конденсатора 15;

$\varepsilon_3$  - диэлектрическая проницаемость его диэлектрика.

При установлении автоматического переключателя 3 в положение 1, сигнал на входе микроЭВМ 8, определяется выражением:

$$U_{10} = \frac{S \cdot (1 + \gamma_3) \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot k_5 \cdot \varepsilon_3 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) (1 + \gamma \Delta)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}, \quad (22)$$

При установлении автоматического переключателя 3 в положение 2, сигнал на входе микроЭВМ 8, определяется выражением:

$$U_{11} = \frac{S \cdot (1 + \gamma_3) (1 + \gamma \omega_2) U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \cdot k_5 \cdot \varepsilon_3 \cdot k_4 (1 + \gamma_4) (1 + \gamma \Delta)}{k_3 \cdot \varepsilon_2}. \quad (23)$$

Следующий шаг программы проведения измерений состоит в вычислении относительной разности напряжений  $U_{10}$  и  $U_{11}$ , отнесенной к напряжению  $U_{10}$ . В результате получаем

$$\begin{aligned} \frac{U_{10} - U_{11}}{U_{10}} &= \\ &= \frac{U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1 - U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 (1 + \gamma \omega_2)}{U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1} \end{aligned}$$

При подстановке коэффициента передачи  $k_1$  аттенюатора 11 в соответствие с выражением (18), получаем

$$\frac{U_{10} - U_{11}}{U_{10}} = \frac{\varepsilon_1(m_c) - \varepsilon_1(m_b, m_c)}{\varepsilon_1(m_c)}. \quad (24)$$

Диэлектрическая проницаемость влажного материала на низкой частоте, то есть действительная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости на низкой частоте пропорциональна массе влаги и массе сухого вещества и не зависит от массы проводящих веществ

$$\varepsilon_1(m_b, m_c) = k_6 \cdot (m_b + m_c),$$

где  $k_6$  - коэффициент пропорциональности.

Диэлектрическая проницаемость влажного материала на высокой частоте, за счет явления дисперсии, пропорциональна в основном массе сухого вещества и также не зависит от массы проводящих веществ в объеме датчика  $\varepsilon_1(m_c) = k_6 m_c$ .

Подставляя найденные значения  $\varepsilon_1(m_b, m_c)$  и  $\varepsilon_1(m_c)$  в полученное выражение (24), окончательно получим

$$\frac{U_{10} - U_{11}}{U_{10}} = \frac{m_b}{m_c} = P. \quad (25)$$

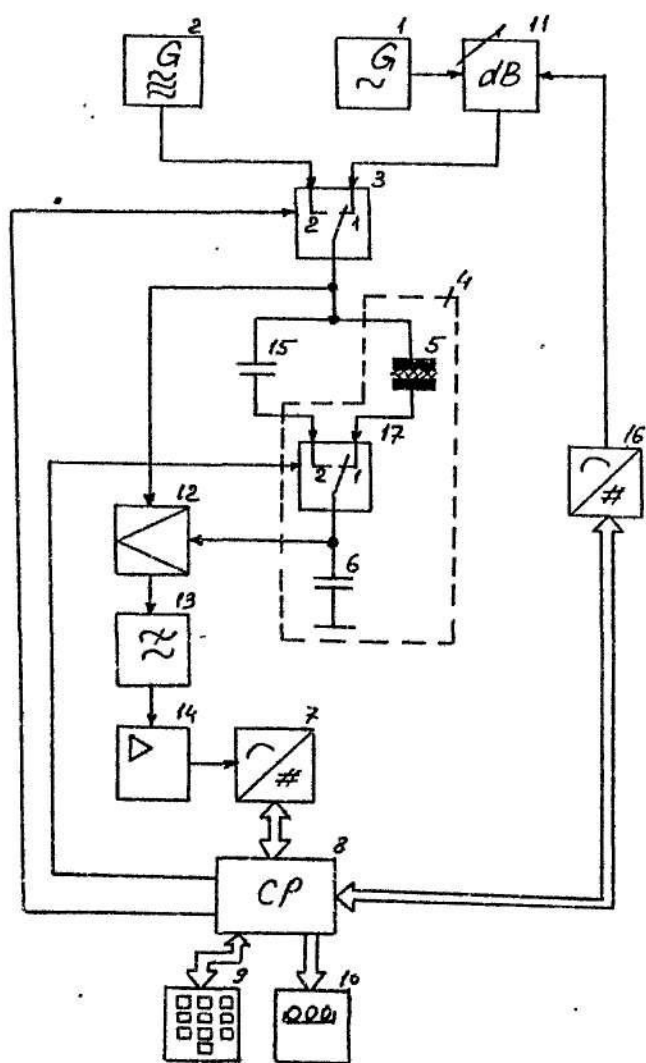
Выражение (25) определяет влагосодержание исследуемого материала. Для того, чтобы определить влажность, необходимо выполнить операцию

$$W = \frac{P}{1 + P} \cdot 100\%.$$

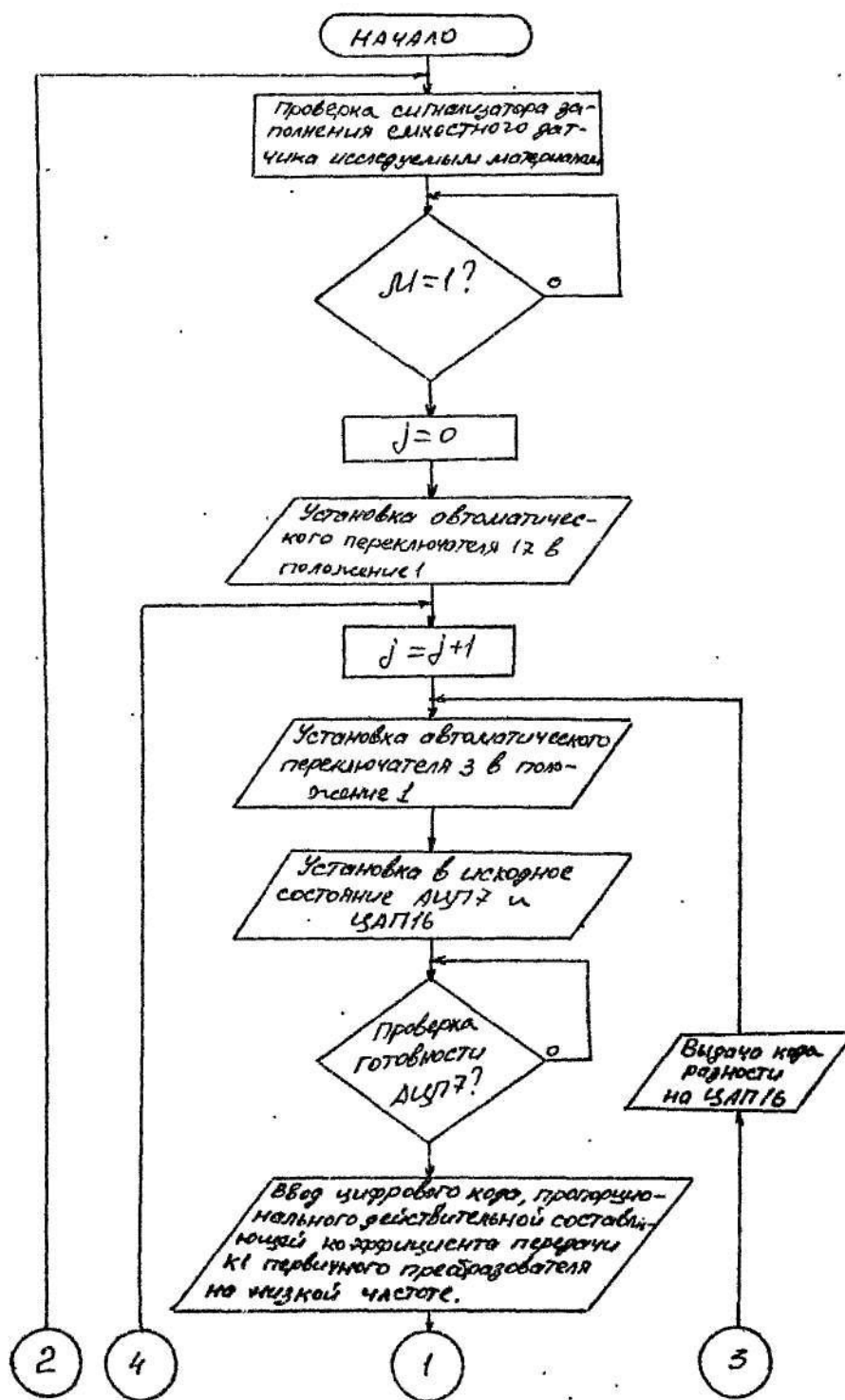
В результате получаем

$$W = \frac{m_b}{m_b + m_c} \cdot 100\%.$$

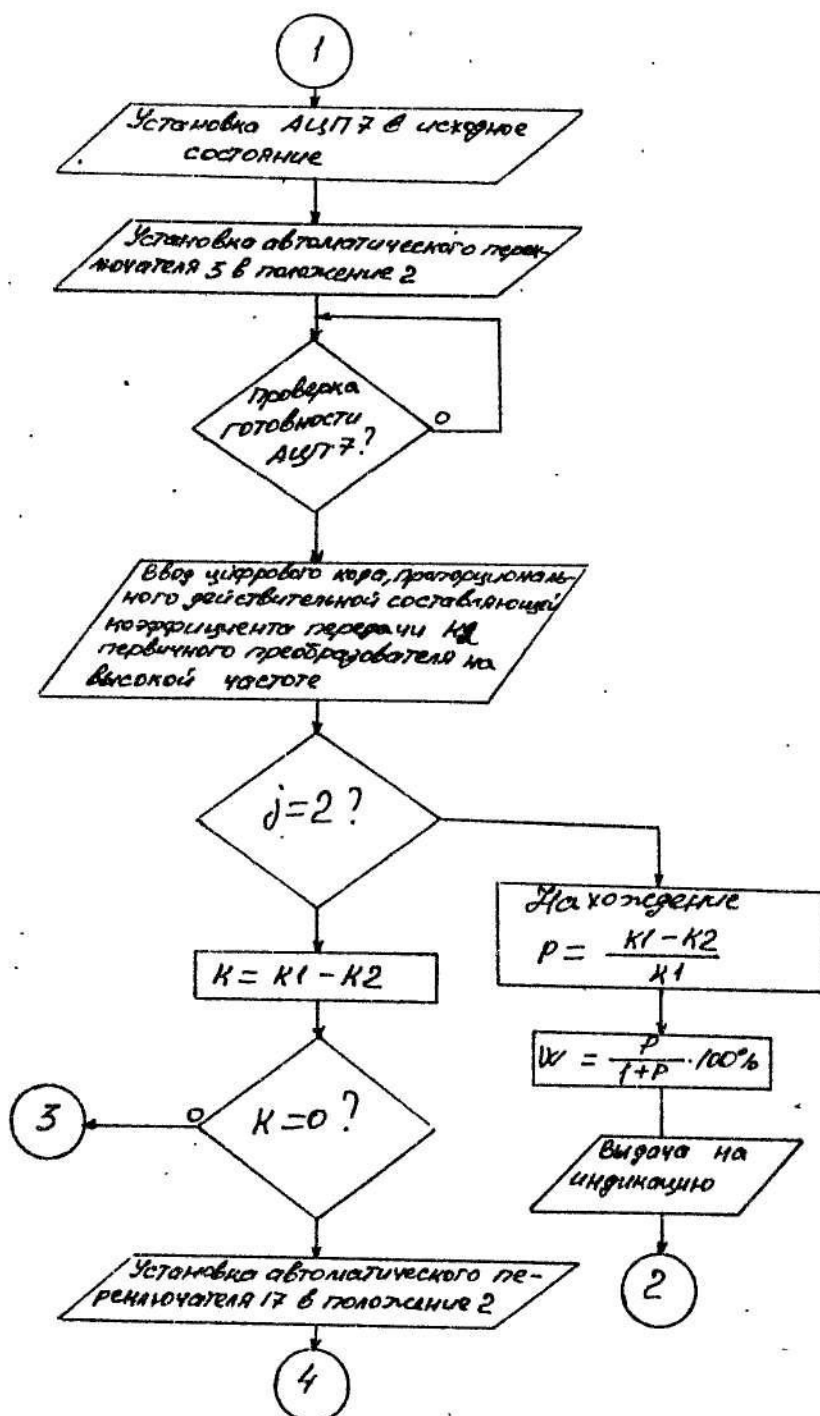
При этом регистрируемое напряжение (25), не зависит от массы проводящих веществ в объеме емкостного датчика 5, временной и амплитудной нестабильностей низкочастотного и высокочастотного напряжений, геометрических размеров емкостного датчика 5 и первого образцового конденсатора 6, крутизны преобразования множительного блока, его частотной погрешности и т.п., что повышает точность определения МДВ. Алгоритм работы микроЭВМ изображен на фиг. 2.



Фиг. I



Фиг. 2



Фиг. 2/продолжение/