

Изобретение относится к области влагометрии и может быть использовано для контроля влажности сыпучих материалов, преимущественно для экспрессного измерения массовой доли влаги (МДВ) в кормовых материалах (зеленой массе, идущей на силос, сене, фуражном зерне и т.п.).

Известны емкостные двухчастотные влагомеры (Патент США №3504280, кл. G01N27/22, 1970), содержащие генератор высокой частоты и генератор низкой частоты, сумматор, емкостной датчик, широкополосный усилитель, фильтры верхних и нижних частот, детекторы, дифференциальный усилитель, сервопривод, механически связанный с аттенуатором генератора низкой частоты и самописец.

Недостатком этих устройств является невысокая точность определения влажности из-за неидентичности и нестабильности параметров двухканальной части схемы обработки сигналов двух частот, а также нестабильность амплитуд сигналов высокой и низкой частот, генерируемых двумя независимыми источниками.

Известны одноканальные двухчастотные влагомеры (Дубров Н.С. и др. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - С.125), содержащие генераторы высокой и низкой частот, которые поочередно, с низкой частотой коммутации, подключаются к емкостному датчику с материалом, и детекторную схему выделения напряжения огибающей частоты коммутации, амплитуда которого пропорциональна разности проводимостей емкостного датчика на двух частотах.

Недостатком этих устройств является погрешность измерения влажности от нестабильности амплитуд генераторов высокой и низкой частот и от неравномерности частотной характеристики широкополосного усилителя на выходе емкостного датчика, которым поочередно усиливаются сигналы высокой и низкой частот.

Известен также измеритель влажности (А.с. СССР №1224684, кл. G01N22/04, опубл. 1986), содержащий генератор низкой частоты, подключенный через регулируемый аттенуатор к последовательно соединенным емкостному датчику и образцовому конденсатору, первые последовательно соединенные усилитель частоты коммутации и синхронный детектор, вторые последовательно соединенные усилитель частоты коммутации и синхронный детектор, индикатор, подключенный к выходу второго синхронного детектора, интегратор, подключенный к выходу первого синхронного детектора. Кроме того, устройство содержит генератор модулирующих сигналов, генератор высокой частоты, второй регулируемый аттенуатор, повторитель напряжения, входом подключенный к высокопотенциальному электроду образцового конденсатора, выходом подключенный к входу первого амплитудного детектора, выход последнего подключен к входу первого усилителя частоты коммутации, второй амплитудный детектор, входом подключенный к выходам первого и второго регулируемых аттенуаторов, выходом подключенный к входу логарифмического преобразователя, выход последнего подключен к входу второго усилителя частоты коммутации, выход интегратора через встречно в соединенные выпрямительные диоды соединен с

управляющими входами первого и второго регулируемых аттенуаторов, а управляющие входы генератора низкой частоты и генератора высокой частоты соединены с противофазными входами генератора модулирующих сигналов и, соответственно, с первыми и вторыми управляющими входами первого и второго синхронных детекторов, второй регулируемый аттенуатор входом подключен к выходу генератора высокой частоты.

Благодаря автоматическому уравниванию амплитуд низкочастотного и высокочастотного генераторов, устраняется влияние нестабильности параметров генераторов и усилительно-преобразовательного тракта на точность измерения влажности. Однако, измерение массовой доли влаги (МДВ) в контролируемых материалах возможно только при малых влажностях, когда отношение  $\frac{m_b}{m_b + m_c}$ , где  $m_b$  - масса влаги,  $m_c$  - масса сухого контролируемого вещества, многим меньше единицы. В этом случае, логарифмическое преобразование величины:

$$\ln\left(1 - \frac{\Delta \varepsilon^*(m_b)}{\varepsilon^*(m_b, m_c)}\right),$$

по правилам приближенных вычислений, дает отношение:

$$\frac{\Delta \varepsilon^*(m_b)}{\varepsilon^*(m_b, m_c)} = \frac{m_b}{m_b + m_c},$$

которое пропорционально МДВ.

В случае измерения средних (больше 10%), и больших влажностей, логарифмическое преобразование не обеспечивает получение сигнала, пропорционального МДВ, так как разложение логарифмической функции в ряд дает выражение

$$\ln\left(1 - \frac{m_b}{m_b + m_c}\right) = -\left[\frac{m_b}{m_b + m_c} + \frac{1}{2}\left(\frac{m_b}{m_b + m_c}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{m_b}{m_b + m_c}\right)^3 + \dots\right].$$

Приведенное выражение, пропорционально

$$\frac{m_b}{m_b + m_c} \ll 1,$$

МДВ только при т.е. при контроле слабо увлажненных материалов. При контроле влажных материалов, в частности кормовых материалов, в которых влажность изменяется от (8 - 10)% до (60 - 70)% (см. градуировочные таблицы емкостного влагомера кормовых материалов "Электроника ВЛК-01", паспорт 208.00.00.000ПС), возникает большая методическая погрешность, составляющая десятки процентов. Градуировочные таблицы не всегда обеспечивают высокую точность измерения, так как не учитывают микрэлементный состав кормового материала, выращенного на различных почвах.

В основу изобретения поставлена задача создать емкостной двухчастотный влагомер, в котором введение новых узлов позволило бы обеспечить точность контроля влажности при измерении массовой доли влаги контролируемых кормовых материалов, подлежащих хранению, в

диапазоне значений от единиц процентов до десятков процентов, благодаря чему повысилась бы экспрессность контроля влажности в полевых условиях.

Поставленная задача достигается тем, что емкостной двухчастотный влагомер, содержащий генератор низкой частоты, подключенный через регулируемый аттенуатор к последовательно соединенным емкостному датчику и образцовому конденсатору, первые последовательно соединенные усилитель частоты коммутации и синхронный детектор, вторые последовательно соединенные усилитель частоты коммутации и синхронный детектор, индикатор, подключенный к выходу второго синхронного детектора, интегратор подключенный к выходу первого синхронного детектора, согласно изобретению, снабжен первым и вторым множительными блоками, первым и вторым фильтрами нижних частот, широкополосным усилителем, дифференциальным усилителем, источником стабилизированного напряжения, вторым интегратором, умножителем частоты, делителем частоты и автоматическим переключателем, один из входов которого соединен с выходом регулируемого аттенуатора, другой вход соединен с выходом генератора низкой частоты через умножитель частоты, выход автоматического переключателя соединен с входом емкостного датчика, одним входом первого множительного блока и двумя входами второго множительного блока, другой вход первого множительного блока соединен с выходом емкостного датчика и входом образцового конденсатора, выход последнего заземлен, выход первого множительного блока соединен с входом первого фильтра нижних частот, выход которого соединен с входом первого усилителя частоты коммутации, выход второго множительного блока соединен с входом широкополосного усилителя, выход которого подключен к входу второго фильтра нижних частот, выход последнего соединен с входом второго усилителя частоты коммутации и с одним из входов дифференциального усилителя, к другому входу которого подключен выход источника стабилизированного напряжения, выход дифференциального усилителя соединен с входом второго интегратора, выход которого подключен к управляющему входу широкополосного усилителя, выход индикатора подключен к управляющему входу регулируемого аттенуатора, управляющий вход автоматического переключателя, а также управляющие входы первого и второго синхронных детекторов соединены с выходом делителя частоты, входом подключенного к выходу генератора низкой частоты.

Введение первого и второго множительных блоков, первого и второго фильтров нижних частот, широкополосного усилителя, дифференциального усилителя, источника стабилизированного напряжения, второго интегратора, автоматического переключателя, умножителя частоты, делителя частоты, включенных указанным выше образом и воздействие их на регулируемый аттенуатор, первый и второй усилители частоты коммутации и емкостный датчик приводит к тому, что напряжение на входе емкостного датчика перемножается с напряжением на его выходе и

его низкочастотная составляющая, зависящая как от влажности исследуемого материала, так и от его активных потерь, через интегратор, воздействует на управляющий вход аттенуатора, изменяя напряжение генератора низкой частоты пропорционально массовой доле влаги исследуемого материала. В результате этого, при перемножении каждого из пакетов низкочастотных и высокочастотных колебаний, самих на себя, переменная составляющая на выходе второго фильтра нижних частот устанавливается также пропорциональной массовой доле влаги исследуемого материала, а его постоянная составляющая обрабатывается системой быстродействующей автоматической регулировки усиления для исключения влияния изменений амплитуды низкочастотного и высокочастотного напряжений в процессе измерения. Переменная составляющая на выходе второго фильтра нижних частот выпрямляется и отображается на индикаторе. Это позволяет повесть точность контроля влажности при измерении МДВ контролируемых материалов в диапазоне значений от единиц процентов до десятков процентов.

На чертеже (фиг.) показана блок-схема емкостного двухчастотного влагомера.

Устройство содержит генератор низкой частоты 1, делитель частоты 2, умножитель частоты 3, регулируемый аттенуатор 4, автоматический переключатель 5, емкостной датчик 6, образцовый конденсатор 7, второй множительный блок 8, первый множительный блок 9, широкополосный усилитель 10, первый фильтр нижних частот 11, второй фильтр нижних частот 12, первый усилитель частоты коммутации 13, второй усилитель частоты коммутации 14, первый синхронный детектор 15, второй синхронный детектор 16, интегратор 17, дифференциальный усилитель 18, источник стабилизированного напряжения 19, второй интегратор 20 и индикатор 21.

Генератор низкой частоты 1 соединен с одним из входов автоматического переключателя 5 через регулируемый аттенуатор 4, а с другим входом автоматического переключателя 5 - через умножитель частоты 3, выход автоматического переключателя 5 соединен с: входом емкостного датчика 6, одним входом первого множительного блока 9 и двумя входами второго множительного блока 8, другой вход первого множительного блока 9 соединен с выходом емкостного датчика 6, выход последнего соединен также с входом образцового конденсатора 7, выход последнего заземлен, выход первого множительного блока 9 соединен с входом первого фильтра нижних частот 11, выход которого подается на вход первого усилителя частоты коммутации 13, выходом соединенного с одним входом первого синхронного детектора 15, выход последнего подключен к управляющему входу регулируемого аттенуатора 4 через интегратор 17, выход второго множительного блока 8 подается на вход широкополосного усилителя 10, выход которого подключен к входу второго фильтра нижних частот 12, выход последнего соединен с входом второго усилителя частоты коммутации 14 и с одним из входов дифференциального усилителя 18, к другому входу последнего подключен выход источника стабилизированного напряжения 19,

выход дифференциального усилителя 18 соединен с входом второго интегратора 20, выход которого подключен к управляющему входу широкополосного усилителя 10, выход второго усилителя частоты коммутации 14 соединен с одним входом второго синхронного детектора 16, выходом подключенного к индикатору 21, другой вход первого синхронного детектора 15, другой вход синхронного детектора 16, а также управляющий вход автоматического переключателя 5 поданы на выход делителя частоты 2, входов подключенного к выводу генератора низкой частоты 1.

Емкостной и двухчастотный влагомер работает следующим образом.

На входы автоматического переключателя 5 поступают низкочастотное и высокочастотное напряжения. С выхода генератора низкой частоты 1, через аттенуатор 4, поступает низкочастотное напряжение, равное

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

Высокочастотное напряжение выделяется на выходе умножителя частоты 3 и определяется выражением

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

где  $U_{m1}, U_{m2}$  - амплитуды низкочастотного и высокочастотного напряжений:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta U_{m1}}{U_{m1}}; \gamma_2 = \frac{\Delta U_{m2}}{U_{m2}}$$

- относительные нестабильности амплитуд, соответственно, низкочастотного и высокочастотного напряжений;

$k_1$  - коэффициент передачи аттенуатора 4.

На выходе автоматического переключателя 5 формируются чередующиеся пакеты низкочастотного напряжения частоты  $\omega_1$  и высокочастотного напряжения частоты  $\omega_2$ , которые воздействуют на последовательно включенные емкостной датчик 6 и образцовый конденсатор 7. Емкостной датчик 6 заполнен контролируемым материалом. Номинал образцового конденсатора 7 выбирают из условия превышения его емкости в 100 - 1000 раз над емкостью емкостного датчика 6. Частоту коммутации  $\Omega$  автоматического переключателя 5 выбирают в 50 - 100 раз меньше частоты генератора низкой частоты 1.

Полная проводимость емкостного датчика 6 на низкой частоте определяется выражением

$$Y_1 = k_2 \cdot \omega_1 \cdot \epsilon^* (m_v, m_c, m_n).$$

где  $k_2$  - коэффициент пропорциональности, определяемый геометрическими размерами емкостного датчика 6;

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

Падение низкочастотного напряжения на образцовом конденсаторе 7, проводимость которого намного больше проводимости емкостного датчика 6, будет определяться выражением:

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

где  $Y_2$  - проводимость образцового конденсатора 7 на низкой частоте.

Образцовый конденсатор 7 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 его можно пренебречь. Проводимость образцового конденсатора 7 на низкой частоте  $\omega_1$  определяется выражением:

$$Y_2 = k_3 \cdot \omega_1 \cdot \epsilon_2,$$

где  $k_3$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров образцового конденсатора 7;

$\epsilon_2$  - диэлектрическая проницаемость его диэлектрика.

С учетом проводимостей емкостного датчика и образцового конденсатора, падение низкочастотного напряжения на образцовом конденсаторе 7, будет равно:

$$U_3 = \frac{k_1 \cdot U_{m1} (1 + \gamma_1) \cdot k_2 \cdot \omega_1 \cdot \epsilon_1^* (m_v, m_c, m_n) \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1)}{k_3 \cdot \omega_1 \cdot \epsilon_2}$$

где  $\Delta \varphi_1$  - фазовый сдвиг, определяемый соотношением реактивной и активной проводимостей емкостного датчика на низкой частоте.

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

$$Y_3 = k_2 \cdot \omega_2 \cdot \epsilon_1^* (m_c, m_n),$$

где  $\epsilon_1^* (m_c, m_n)$  - комплексная диэлектрическая проницаемость, пропорциональная массе сухого вещества  $m_c$  и массе проводящих веществ  $m_n$  в объеме датчика.

Падение высокочастотного напряжения на образцовом конденсаторе 7 определяется выражением

$$U_4 = \frac{Y_3 \cdot U_2}{Y_4},$$

где  $Y_4$  - проводимость образцового конденсатора 7 на высокой частоте, которая определяется выражением

$$Y_4 = k_3 \cdot \omega_2 \cdot \epsilon_2.$$

В соответствие с полученными выражениями, падение высокочастотного напряжения на образцовом конденсаторе 7 будет равно

$$U_4 = \frac{U_{m2} (1 + \gamma_2) \cdot k_2 \cdot \omega_2 \cdot \epsilon_1^* (m_c, m_n) \cdot \cos(\omega_2 t + \varphi_2)}{k_3 \cdot \omega_2 \cdot \epsilon_2}$$

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

Пакеты падений низкочастотного и высокочастотного напряжений на образцовом конденсаторе 7 воздействуют на один вход первого множительного блока 9, на другой вход

которого поступают пакеты этих же напряжений непосредственно с выхода автоматического переключателя 5. На выходе первого множительного блока 9 выделяются постоянные составляющие пакетов низкочастотного и высокочастотного напряжений, пропорциональные только реактивным составляющим комплексной диэлектрической проницаемости и не зависящие от массы проводящих веществ в объеме датчика.

При перемножении пакетов низкочастотного напряжения, постоянная составляющая определяется выражением

$$U_5 = S \cdot U_3 \cdot U_1 =$$

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

При перемножении пакетов высокочастотного напряжения, постоянная составляющая определяется выражением

$$U_6 = S \cdot U_4 \cdot U_2 =$$

$$= S \cdot \frac{U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \cdot k_2 \cdot \varepsilon_1 (m_c)}{k_2 \cdot \varepsilon_2}$$

Постоянные составляющие  $U_5$  и  $U_6$  поступают на вход первого фильтра нижних частот 11. Если  $U_5 \neq U_6$ , то на выходе первого фильтра нижних частот 11 выделяется переменная составляющая частоты коммутации  $\Omega$ , пропорциональная полуразности напряжений  $U_5$  и  $U_6$ . Переменная составляющая усиливается первым усилителем частоты коммутации 13 и выпрямляется первым синхронным детектором 15, выходное напряжение которого заряжает интегратор 17, соединенный с управляющим входом регулируемого аттенюатора 14.

В результате изменения коэффициента передачи  $k_1$  аттенюатора 4, изменяется амплитуда низкочастотного напряжения до установления постоянной составляющей частоты коммутации, равной нулю. При этом, достигается условие равенства напряжений  $U_5 = U_6$ . Если пренебречь статизмом системы автоматического регулирования, то можно записать:

$$U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 \cdot \varepsilon_1 (m_b, m_c) = \\ = U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \cdot \varepsilon_1 (m_c).$$

Отсюда находим коэффициент передачи аттенюатора 4

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

Параллельно, пакеты низкочастотного напряжения с выхода управляемого аттенюатора 4 и пакеты высокочастотного напряжения с выхода умножителя частоты 3, непосредственно воздействуют на входы второго множительного блока 8. В результате перемножения пакетов напряжений одинаковых частот, на его выходе

поочередно образуются постоянные составляющие напряжений

$$U_7 = k_1^2 \cdot S \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2,$$

$$U_8 = S \cdot U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2.$$

Импульсы напряжений  $U_7$  и  $U_8$  проходят через широкополосный усилитель 10, который одинаково усиливает оба напряжения:

$$U_9 = S \cdot k_4 \cdot k_1^2 \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2,$$

$$U_{10} = S \cdot k_4 \cdot U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2,$$

где  $k_4$  - коэффициент усиления широкополосного усилителя 10.

В качестве широкополосного усилителя 10 может быть выбран широкополосный усилитель с системой быстрогодействия автоматической регулировки усиления.

Постоянная составляющая последовательности импульсов, выделенная вторым фильтром нижних частот 12 (пропорциональная полусумме напряжений

импульсов  $U_9$  и  $U_{10}$ ) воздействует на один вход дифференциального усилителя 18, на другой вход которого воздействует постоянное опорное

напряжение  $U_0 = \text{const}$  от источника стабилизированного напряжения 19. Разностное напряжение с выхода дифференциального усилителя 18, через второй интегратор 20, воздействует на управляющий вход широкополосного усилителя 10. Процесс автоматического регулирования коэффициента усиления длится до тех пор, пока постоянная составляющая последовательности импульсов  $U_9$  и  $U_{10}$  не уравнивается с опорным напряжением  $U_0$ . В результате установления равенства сравниваемых напряжений, имеем:

$$U_{11} = \frac{U_9 + U_{10}}{2} = \frac{S \cdot k_4}{2} \times$$

$$\times \left[ U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 \cdot k_1^2 + U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \right] = U_0$$

Коэффициент усиления широкополосного усилителя 10, при этом, принимает значение

$$k_4 = \frac{2 U_0}{S \cdot \left[ k_1^2 \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 + U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \right]}.$$

Переменная составляющая последовательности импульсов  $U_9$  и  $U_{10}$  на выходе второго фильтра нижних частот 12, пропорциональная полуразности напряжений импульсов:

$$U_{12} = \frac{U_9 - U_{10}}{2} = \frac{S \cdot k_4}{2} \times$$

$$\times \left[ k_1^2 \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 - U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2 \right].$$

усиливается вторым усилителем частоты

коммутации 14 и выпрямляется вторым синхронным детектором 16.

С учетом значения коэффициента усиления  $k_4$ , переменная составляющая на выходе второго фильтра нижних частот 12, принимает значение

$$U_{12} = \frac{k_1^2 \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 - U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2}{k_1^2 \cdot U_{m1}^2 (1 + \gamma_1)^2 + U_{m2}^2 (1 + \gamma_2)^2} = U_0$$

Подставив в полученное выражение значение коэффициента передачи  $k_4$  аттенюатора 4, окончательно получим

$$U_{12} = \frac{\varepsilon_1(m_c) - \varepsilon_1(m_b, m_c)}{\varepsilon_1(m_c) + \varepsilon_1(m_b, m_c)}$$

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

$$\varepsilon(m_b, m_c) = k_5 \cdot (m_b + m_c),$$

где  $k_5$  - коэффициент пропорциональности.

Диэлектрическая проницаемость влажного материала на высоких частотах, за счет явления дисперсии, пропорциональна в основном массе сухого вещества и также не зависит от массы проводящих веществ в объеме датчика:

$$\varepsilon(m_c) = k_5 \cdot m_c.$$

Подставляя найденные значения  $\varepsilon(m_b, m_c)$  и  $\varepsilon(m_c)$  в полученное выражение для  $U_{12}$ , окончательно получим

$$U_{12} = \frac{m_b}{m_b + 2 m_c}.$$

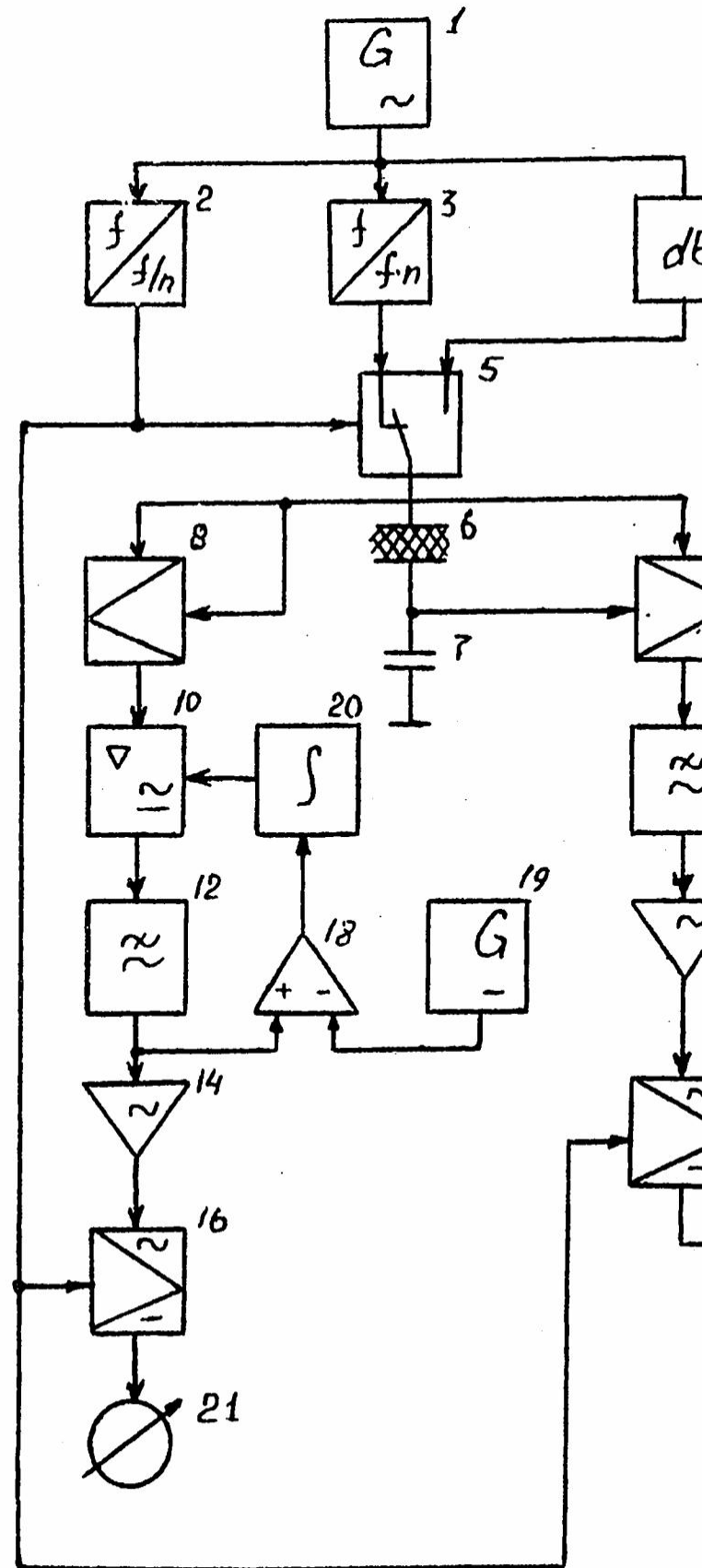
В сельскохозяйственных продуктах, в частности, кормовых материалах, массовая доля влаги доходит до (70 - 80)%. Поэтому в контролируемых материалах масса сухого вещества много меньше массы влаги ( $m_c \ll m_b$ ). Таким образом, полученное выражение, пропорционально МДВ

$$U_{12} = \frac{m_b}{m_b + m_c}.$$

Выходное напряжение второго синхронного детектора 16 отображается на индикаторе 21, отрадуированного в значениях массовой доли влаги контролируемых материалов.

При малых значениях МДВ, тогда  $m_b$  и  $m_c$  соизмеримы, в показания индикатора необходимо ввести поправку, которая заранее рассчитывается для каждого значения МДВ.

При этом регистрируемое напряжение  $U_{12}$  не зависит от массы проводящих веществ в объеме емкостного датчика 6, временной и амплитудной нестабильностей низкочастотного и высокочастотного напряжений, геометрических размеров емкостного датчика 6 и образцового конденсатора 7, крутизны преобразования множительных блоков и т.п., что повышает точность определения МДВ.



Фиг.