Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕМКОСТНОГО АВТОКОМПЕНСАЦИОННОГО ВЛАГОМЕРА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Е. С. Кричевский, Р. М. Проскуряков

Принцип автокомпенсации позволяет добиться повышения точности систем контроля влажности, что может быть показано анализом таких систем с позиции теории информации.

Среднее значение негэнтропии — количества информации для получения предельной точности измеряемой величины q_0, вычисленной по току датчика, составляет около 7 дес. ед. Однако ток датчика содержит не только полезную информацию о контролируемой влажности, но и помехи (шумы). Соотношение между полезной информацией и шумами можно определить через коэффициент корреляции системы r

$$q_0' = q_0 - \frac{1}{2}\ln(1 - r^2).$$

Практически значение r, вычисленное, например, для одной из моделей разомкнутой влагометрической системы «Стенлайт», равно 0,82. Тогда $q_0' = 7{,}43$ дес. ед.

Количество полезной информации q на выходе влагометрической системы определяется, исходя из относительной приведенной погрешности, которая для названного влагомера составляет 12%,

$$q = \lg\frac{2}{\gamma} = 0{,}78 \text{ дес. ед.}$$

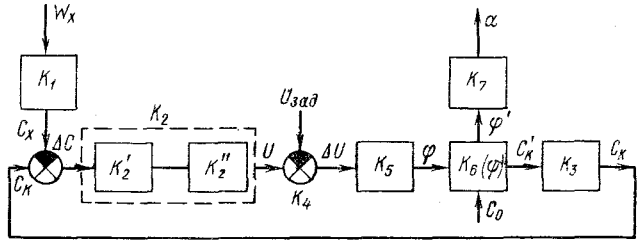
Тогда информационный к. п. д.

$$\eta_i = \frac{q}{q_0'}\,100 = \frac{0{,}78}{7{,}43}\cdot 100 = 10{,}4\%.$$

Рассмотрим теперь этот вопрос применительно к автокомпенсационному влагомеру, разработанному в Ленинградском горном институте (см. блок-схему). На вход сравнивающего устройства K_8 измерительной схемы K_2 вводится емкость C_x, соответствующая в рассматриваемом случае значению измеряемой влажности W_x, и емкость $C_к$, компенсирующая изменение C_x на входе измерительной схемы. В структурной схеме необ-

ходимо выделить блок преобразования измеряемой влажности в емкость K_1, блок измерения K_2, состоящий из измерительной схемы K'_2 и преобразователя K''_2, блок настройки чувствительности K_3, блок сравнения K_4, блок преобразования эталонной емкости K_6.

Контролируемая влажность W_x, преобразованная блоком в электрическую емкость C_x, поступает на вход измерительной схемы вместе с компенсирующей ее емкостью $C_к$. Разность — сигнал ошибки ΔC — поступает



Блок-схема емкостной влагометрической системы автокомпенсационного типа:

K_5 — двигатель с оконечным каскадом; K_7 — блок преобразования положения компенсационного элемента в величину, удобную для регистрации и записи

на измерительную схему K'_2, затем на преобразователь K''_2, где преобразуется в нужный электрический сигнал и усиливается, а затем через блок сравнения K_4 подается на силовой исполнительный элемент K_5, управляющий компенсационным элементом — составной частью блока преобразования эталонной емкости K_6. В блоке K_6 угол поворота вала двигателя φ преобразуется в соответствующее изменение эталонной емкости C_0 до значения $C'_к$, которое после преобразования в блоке настройки чувствительности K_3 до значения $C_к$ уравновешивает емкость C_x в блоке сравнения.

Определяющей чертой этого метода измерения является наличие обратного преобразования выходной величины в величину однородную с преобразуемой (емкостью) и их взаимное уравновешивание. Влагометрическую систему с уравновешивающим преобразованием информации от систем прямого преобразования метрологически отличает совершенно иной характер зависимости погрешности отдельных преобразующих элементов.

Если чувствительность и погрешность влагометрической системы прямого действия обозначить через K_2 и γ_2, а обратного — через K и γ, коэффициент преобразования (ослабления) и погрешность обратного преобразования (цепи обратной связи) — через β и γ_β; относительную величину недокомпенсации в момент отсчета — через

$$\alpha = \frac{1}{1 + K_2\beta}, \qquad (1)$$

то чувствительность при обратной связи падает в α раз

$$K = \frac{K_2}{1 + K_2\beta} = \alpha K_2,$$

но за счет этого примерно в то же число раз уменьшается погрешность аппаратуры

$$\gamma = \gamma_\beta (1 - \alpha) + \gamma_2 \alpha = \gamma_\beta + \frac{\gamma_2}{1 + K_2\beta}$$

до тех пор, пока

$$\gamma_\beta \ll \gamma_2,$$

т. е., пока погрешность обратного преобразования остается ниже, чем погрешность системы прямого действия, можно считать, что

$$\gamma \approx \frac{\gamma_2}{1 + K_2\beta} = \alpha\gamma_2. \qquad (2)$$

Для рассматриваемой замкнутой влагометрической системы, согласно приведенным расчетным формулам,

$$K_2\beta = 5 \div 7.$$

Тогда относительная недокомпенсация в момент отсчета

$$\alpha = \frac{1}{1 + K_2\beta} = \frac{1}{1 + 5} = 0{,}17,$$

а относительная погрешность влагометрической системы с уравновешивающим преобразованием

$$\gamma = \gamma_2\alpha = 12 \cdot 0{,}17 = 2{,}04\%.$$

Информационный к. п. д., согласно приведенным выше формулам, при

$$q = \lg\frac{2}{\gamma} = \lg 2 - \lg\gamma = 0{,}3 - \lg 0{,}024 = 0{,}3 + 1{,}62 = 1{,}92 \text{ дес. ед.}$$

достигает величины

$$\eta_u = \frac{q}{q_0} 100 = \frac{1{,}92}{7{,}43} 100 = 26\%.$$

Таким образом, преимущества влагометрических систем с уравновешивающим преобразованием неоспоримы. Кроме того, применение силовых исполнительных устройств в следящей системе влагомера дает возможность легко сочленить эти приборы с исполнительными механизмами сигнализирующих устройств и регуляторов, а также с различного рода вторичными преобразователями (перемещение — напряжение, угол поворота — код и т. д.).

В зависимости от требований технологии и типа датчика влагомера может быть осуществлен непрерывный контроль влажности материалов, например, в потоке, трубопроводе, на конвейерной ленте и т. д., или дискретное измерение, т. е. определение влажности отдельных проб.

Метод уравновешивающего преобразования встречается в ряде разработок влагометрических систем [1], но в литературе не освещен вопрос о статических погрешностях таких систем, накапливающихся под воздействием внешних возмущений на элементы влагомера, а также вопрос о погрешности системы в различных установившихся режимах работы.

Как видно из формулы (2), статическая погрешность, которая может возникнуть во влагомере замкнутого типа, достигает величины не большей $\alpha\gamma_2$ при условии постоянства передаточных коэффициентов системы.

Эта оценка погрешности неопределенна, если не учесть некоторые факторы, связанные со спецификой работы влагомера.

Рассмотрим подробнее составляющие выражения $\alpha\gamma_2$, входящего в формулу (2). Из формулы (1) видно, что значение α остается постоянным лишь при постоянстве коэффициентов K_2 и β. В действительности эти коэффициенты изменяются. Коэффициенты передачи отдельных блоков так же, как и номинальные значения элементов системы, в результате действия различных факторов, вызванных статистическим характером внешних возмущений (температуры, давления, влажности, электромагнитных полей, механических воздействий и т. д.), могут рассматриваться как случайные величины. Значит, и погрешности, возникающие во влагомере в установившихся режимах, определяются случайными приращениями K. Влагометрическую систему в целом можно характеризовать погрешностью

$$\Delta\alpha = W_x \Delta K,$$

где $\Delta\alpha$ — погрешность выходного сигнала α; W_x — входной сигнал; $\Delta K = K - K_0$ — приращение коэффициента передачи системы.

Пусть система с коэффициентом передачи K содержит элементы $\xi_1, \ldots, \xi_m$, и каждый элемент ее представляет функцию истинного значения элемента при нормальных условиях ξ'_i, возмущений $\Theta_1, \ldots, \Theta_n$ и времени t, т. е.

$$K = K(\xi_1, \ldots, \xi_m),$$

где

$$\xi_i = \xi_i(\xi'_i, \Theta_1, \ldots, \Theta_n, t).$$

Тогда влияние каждого элемента системы с номинальным значением ξ'_{i_0} на коэффициент передачи будет характеризоваться величиной

$$\Delta K = \frac{\partial K}{\partial \xi} \xi'_{i_0} \alpha_{\xi_i \Theta_j},$$

где $\alpha_{\xi_i \Theta_j}$ — коэффициент, показывающий влияние возмущения Θ_j на элемент ξ_i.

Для m элементов

$$K = K_0 + \Delta K = K_0 - \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial K}{\partial \xi} \xi'_{i_0} \alpha_{\xi_i \Theta_j}.$$

Используя теорему о дисперсии функции независимых случайных величин [2], получим

$$D(K) = D(\Delta K) = \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{\partial K}{\partial \xi_i} \xi_{i_0} \alpha_{\xi_i \Theta_j} \right)^2 D(\Theta_j). \qquad (3)$$

Кроме сказанного выше, коэффициент передачи непостоянен из-за наличия многочисленных нелинейных элементов, входящих во влагометрическую систему. Величина β, например, однозначно характеризует коэффициент усиления цепи обратной связи влагомера, содержащей блок K_5, который состоит из двигателя с оконечным усилительным каскадом. Коэффициент передачи этого звена в установившемся режиме (для двухфазного асинхронного двигателя в рассматриваемой влагометрической

системе), полученный [3] с учетом уровня входного сигнала и при аппроксимации механических характеристик двигателя с помощью касательных, наклон которых меняется в зависимости от уровня входного сигнала, имеет вид

$$K_5 = \frac{K_y\left[b^2 + \frac{8\alpha_м}{3\pi}(a-b)\,b + \frac{16\alpha_м^2}{9\pi^2}(a-b)^2 + \omega^2\right]^2}{\left[b + \frac{4\alpha_м}{3\pi}(a-b)\right]\left[b^2 + \frac{12\alpha_м}{3\pi}(a-b)\,b + \frac{32\alpha_м^2}{9\pi^2}(a-b)^2 + \omega^2\right]},$$

где $\alpha = \alpha_м \sin\omega t$ — управляющий сигнал, меняющийся по гармоническому закону; K_y — коэффициент передачи усилителя; $a = \mathrm{tg}\gamma_1$; $в = \mathrm{tg}\gamma_2$; γ_1 и γ_2 — соответственно угол наклона касательных к оси ординат, когда $\alpha = 1$ и $\alpha = -1$.

Сократив в числителе и знаменателе полиномы одного порядка малости, получим

$$K_5 \approx \frac{K_y}{b + \frac{4\alpha_м}{3\pi}(a-b)}, \qquad (4)$$

где коэффициент передачи K_5 двухфазного асинхронного двигателя является функцией амплитуды сигнала $\alpha_м$ на входе, вплоть до $K \to \infty$.

Итак, выражение (2) имеет смысл только в той зоне входного сигнала C_x, где двигатель работает на линейной части характеристики и его коэффициент передачи меняется незначительно.

Измерительный блок K_2, а также блок преобразования эталонной емкости K_6 сконструированы таким образом, что имеют минимальные нелинейные искажения в зависимости от входного сигнала, поэтому существенной неопределенности в выражение (2) не вносят. Однако при работе влагометрической системы уровень входного сигнала колеблется в весьма широких пределах, особенно при непрерывном контроле влажности с неавтоматизированным процессом сушки.

Оценим для этого случая предел возможной статической точности влагомера и механизм ее возникновения. Рассмотрим подробнее преобразование сигнала в блок-схеме влагомера, учитывая особенности отдельных блоков и степень их влияния при накоплении статической погрешности всей системы. Как видно из схемы, электромеханическая следящая система влагомера осуществляет непрерывную балансировку измерительной компенсационной цепи в соответствии с изменением входной величины так, что в каждый момент времени выполняется условие

$$[W_x \cdot K_1 - C_0 K_6(\varphi) K_3] K_2' K_2'' K_4 = \Delta U; \qquad (5)$$

$$\varphi K_7 = \alpha. \qquad (6)$$

Блок K_6 конструктивно представляет собой измерительный эталонный конденсатор переменной емкости, ротор которого непосредственно связан с блоком регистрации и записи. Требование линейности шкалы влагомера определяет линейность блока

$$K_6(\varphi) = K_6'\varphi, \qquad (7)$$

где K'_6 — передаточный коэффициент блока, отнесенный к переменной φ.

Учитывая выражения (5)—(7), найдем значение выходного сигнала в момент компенсации

$$\alpha = \frac{W_x K_1 K_7 - \frac{\Delta U K_7}{K_2 K_4}}{C_0 K_6' K_3}.$$

Общий коэффициент передачи влагометрической системы

$$K = \frac{K_1 K_7 - \frac{\Delta U K_7}{W_x K_2 K_4}}{C_0 K_6' K_3}. \tag{8}$$

Рассматриваемая система является астатической 1-го порядка относительно управляющего воздействия W_x. Она, как известно, обеспечивает устранение установившейся ошибки по положению (в рассматриваемом случае — на всех участках шкалы). Ошибка слежения ΔC, которая однозначно характеризует величину напряжения рассогласования $\Delta U = \Delta C K_2 K_4$, равна нулю, если на вход системы поступает постоянный по величине сигнал W_x. Это имеет место в дискретной влагометрической системе, предназначенной для определения влагосодержания отдельных проб.

Коэффициент передачи для этого случая

$$K = \frac{K_1 K_7}{C_0 K_6' K_3}. \tag{9}$$

Как видно из этого выражения, коэффициенты передачи блоков K_2, K_4 не влияют на значение K.

Подставляя формулу (9) в выражение (3), получим для дисперсии K

$$D_k = \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{K_1}{C_0 K_6' K_3} \sum_{i=1}^{m_7} \frac{\partial K_7}{\partial \xi_7} \xi_{i_{7_0}} \alpha_{\xi_{i_{7_4}}} \Theta_j + \right.$$

$$+ \frac{K_7}{C_0 K_6' K_3} \sum_{i=1}^{m_1} \frac{\partial K_1}{\partial \xi_1} \xi_{i_{1_0}} \alpha_{\xi_{i_{7_0}}} \Theta_j - \frac{K_1 K_7}{C_0 (K_6')^2 K_3} \sum_{i=1}^{m_6} \frac{\partial K_6'}{\partial \xi_6} \xi_{i_{6_0}} \alpha_{\xi_{i_6}} \Theta_j -$$

$$\left. - \frac{K_1 K_7}{C_0 K_6' (K_3)^2} \sum_{i=1}^{m_3} \frac{\partial K_3}{\partial \xi_3} \xi_{i_{3_0}} \alpha_{\xi_{i_3}} \Theta_j)^2 D(\Theta_j), \right. \tag{10}$$

откуда видно, что часть дисперсии, обусловленная блоками K_1 и K_7, компенсируется блоками K_3 и K'_6. Следовательно, чувствительность датчика K_1 влагометрической системы должна быть согласована с коэффициентом передачи блока K'_6, который конструктивно представляет собой эталонный конденсатор переменной емкости C_6, подключаемый в контур рабочего генератора измерительной схемы K_2.

Приравняем 2-й и 3-й члены выражения (10) и получим

$$\frac{K_1}{K_6'} = 1. \tag{11}$$

Это означает, что для взаимной компенсации погрешностей блоков K_1 и K'_6 чувствительности их должны быть равны.

Таким же образом получим

$$\frac{K_7}{K_3} = 1. \tag{12}$$

Это достигается определенным соотношением чувствительности датчика и величиной передаточного числа от вала двигателя к ротору эталонного

конденсатора в пределах, допускаемых требуемыми условиями быстродействия и устойчивости влагометрической системы.

Условие (12) легко выполнимо, так как конструкция блоков K_7 и K_3 незамысловата. Блок K_3 представляет собой также конденсатор переменной емкости, номинальное значение емкости C_3 которого определяется двумя условиями

$$C_3 \gg \Delta C_6; \tag{13}$$

$$\frac{K_7}{K_3} = 1,$$

необходимыми для осуществления коррекции чувствительности влагометрической системы.

Таким образом, можно считать установленными составляющие статических погрешностей и пути их уменьшения, когда $W_x = \text{const}$, что справедливо, как уже отмечалось, для влагометрической системы дискретного действия.

При изменении W_x по любому другому закону к статической погрешности, обусловленной внутренними случайными факторами в названных выше электронных блоках влагомера, следует добавить еще погрешность, обусловленную дисперсией коэффициента передачи блока K_1. Для этого выражение (8) приведем к виду

$$K = \frac{K_1 K_7 - K_1}{C_0 K_6 K_3}. \tag{14}$$

Конструктивно блок K_1 представляет собой датчик с соединительным высокочастотным кабелем значительной длины.

При работе влагометрической системы непрерывного действия датчик и соединительный кабель подвержены непрерывному механическому воздействию. Кроме того, контролируемый материал налипает на датчик. Эти случайные факторы, как следует из выражения (14), влияют на коэффициент передачи системы K.

Кроме рассмотренных, система имеет еще погрешность слежения, величина которой зависит от характера изменения входной величины. Рассмотрим этот вид погрешности отдельно, предполагая теперь, что коэффициенты передачи отдельных блоков неизменны, а погрешность каждого отдельного блока отнесем к выходной величине влагометрической системы.

В этом случае необходимо рассмотреть три основные формы изменения входной величины C_x. Для линейного блока K_1 величина C_x однозначно определяется величиной W_x

$$C_x = \frac{dC_x}{dt}\, t; \tag{15}$$

$$C_x = C_{x_0} \sin \omega_{гр} t, \tag{16}$$

где C_x — единичный скачок; $\omega_{гр}$ — граничная частота.

Установившуюся ошибку системы для этих режимов работы определим посредством коэффициентов ошибок. Рассмотрим передаточную функцию ошибки G_p.

Передаточная функция разомкнутой системы без учета постоянных времени высших порядков малости имеет вид [6]

$$W_{(p)} = \frac{D}{(1 + T_{дв}p)(1 + T_2 p)p}, \tag{17}$$

где добротность системы

$$D = K_2' K_2'' K_4 K_5 K_6 K_3. \tag{18}$$

Передаточная функция ошибки слежения [6]

$$G_\sigma = \frac{1}{1 + W_{(p)}}.$$

С учетом выражения (17) получим

$$G_{(p)} = \frac{1}{1 + \dfrac{D}{(1 + T_{\text{дв}} p)(1 + T_2 p) p}} = \frac{T_2 T_{\text{дв}} p^3 + (T_{\text{дв}} + T_2) p^2 + p}{T_{\text{дв}} T_2 p^3 + (T_{\text{дв}} + T_2) p^2 + p + D}. \tag{19}$$

Представим это выражение в виде степенного ряда, разделив числитель на знаменатель [6]

$$\frac{T_2 T_{\text{дв}} p^3 + (T_{\text{дв}} + T_2) p^2 + p}{T_{\text{дв}} T_2 p^3 + (T_{\text{дв}} + T_2) p^2 + p + D} = \frac{p}{D} + \frac{p^2}{D}\left(T_{\text{дв}} + T^2 - \frac{1}{D}\right) +$$

$$+ \frac{p^2}{D}\left[T_{\text{дв}} T_2 - \frac{2(T_{\text{дв}} + T_2)}{D} - \frac{1}{D_2}\right] + \ldots$$

Получим ряд Маклорена

$$G_p = \frac{\Delta C}{C_x} = a_0 + a_1 p + \frac{1}{2} a_2 p^2 + \frac{1}{6} a_3 p^3 + \ldots, \tag{20}$$

где

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= \frac{1}{D} \\ a_2 &= \frac{2}{D}\left(T_{\text{дв}} + T_2 - \frac{1}{D}\right) \end{aligned}\right\}. \tag{21}$$

Ошибка следящей системы, согласно формуле (20),

$$\Delta C = C_x a_0 + C_x a_1 p + \frac{1}{2} C_x a_2 p^2 + \ldots \tag{22}$$

Как следует из выражений (18), (21), (22), ошибка слежения ΔC будет тем меньше, чем больше добротность D системы. Но повышать добротность с целью уменьшения ошибки слежения можно лишь в пределах устойчивой работы системы.

Определим предельно возможную добротность системы. Из передаточной функции разомкнутой системы (17) найдем передаточную функцию замкнутой системы и, приравняв к нулю ее знаменатель, получим характеристическое уравнение системы

$$T_{\text{дв}} T_2 p^3 + (T_2 + T_{\text{дв}}) p^2 + p + D = 0. \tag{23}$$

Для устойчиво работающей системы необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$$

были положительными числами и выполнялось условие

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Для уравнения (23) условие устойчивости имеет вид

$$T_{дв} + T_2 - T_{дв}T_2D > 0,$$

откуда следует, что система будет устойчива, пока добротность

$$D < \frac{T_{дв} + T_2}{T_{дв}T_2}. \qquad (24)$$

Для рассматриваемого случая $T_{дв} = 0{,}2$ *сек* и $T_2 = 0{,}05$ *сек*.

Максимальную ошибку слежения ΔC для случая формулы (15) определим из выражений (21) и (22), ограничиваясь первыми двумя членами ряда

$$\Delta C = C_x a_0 + C_x a_1 p = \frac{dC_x}{dt} \cdot \frac{1}{D} = \frac{8{,}1}{25} = 0{,}32 \text{ } n\phi,$$

что составляет приведенную относительную погрешность порядка 0,01%.

Для названного выше влагомера емкость C_x, соответствующая рабочему диапазону, составляет 35 *пф*. Время пробега кареткой всей шкалы 3 *сек*. Следовательно, граничная скорость изменения емкости $\frac{dC_x}{dt}$, при которой можно провести достоверные измерения,

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{35}{3} = 8{,}1 \text{ } n\phi/сек.$$

При входном сигнале (16) достоверные измерения возможны, как показали наблюдения, лишь при частоте колебания входной величины не более 0,15 *гц* при $\omega_{гр} = 0{,}942$. При дальнейшем повышении частоты форма записи измеряемого сигнала на диаграмме искажается и уменьшается амплитуда.

Вычислим установившуюся ошибку, если входной сигнал определяется выражением (16). На основании формул (21) и (22) имеем

$$\Delta C = C_{x_0}\left[\left(a_0 - \frac{a_2}{2!}\omega_0^2 + \frac{a_4}{4!}\omega_0^4 - \ldots\right)\sin\omega_0 t + \right.$$

$$\left. + \left(a_1\omega_0 - \frac{a_3}{3!}\omega_0^3 + \ldots\right)\cos\omega_0 t.\right.$$

Максимальная амплитуда ошибки соответствует максимальной амплитуде входного сигнала $C_{x_0} = 35$ *пф*

$$|\Delta C| = C_{x_0}\sqrt{\left(a_0 - \frac{a_2}{2!}\omega_0^2 + \ldots\right)^2 + \left(a_1\omega_0 + \frac{a_2}{3!}\omega_0^3\right)^2} \approx$$

$$\approx 35\sqrt{\left(\frac{0{,}0168}{2} \cdot 0{,}942^2\right)^2 + (0{,}04 \cdot 0{,}942)^2} = 5{,}25 \text{ } n\phi,$$

что составляет приведенную относительную погрешность 15%. Такая погрешность получена для самого тяжелого режима работы прибора: при изменении измеряемой величины с частотой 0,15 *гц* с максимально возможной амплитудой. В реальных условиях следует определить спектр измеряемого сигнала и оценить возможную погрешность слежения по высокочастотной гармонической составляющей.

Если на вход системы подать сигнал в виде единичного скачка, что соответствует, например, прохождению под датчиком влагомера

небольшого количества наиболее влажного материала, зависавшего ранее в течке сушильного барабана, то, как видно из выражения (23), установившаяся ошибка системы в этом случае будет равна нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кричевский Е. С., Авдеева А. Ф. Приборы для определения влажности углей и продуктов их переработки. Обогащение и брикетирование угля, 1965, № 11.

2. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Физматгиз, 1964.

3. Бесекерский В. А. и др. Проектирование следящих систем малой мощности. Госэнергоиздат, 1958.

4. Кричевский Е. С. Теоретические основы и анализ систем высокочастотного контроля влажности при обогащении полезных ископаемых. Автореф. докт. дисс., ЛГИ, 1968.

5. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Энергия, 1965.