

ISSN 0136—3360

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Отдельный оттиск

8
1989

ИЗДАНИЕ НОВОЧЕРКАССКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

2. Забродин Ю. С. Узлы принудительной конденсаторной коммутации тиристор.—М.: Энергия, 1974. 129 с.
3. Мазнёв А. С., Рогов А. Н., Сусллова К. Н. Коммутационные узлы автономных инверторов напряжения с выводом избыточной энергии // Электромеханика, 1984. № 11. С. 89—93. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Ситник Н. Х., Чернов С. С. Коммутационные узлы для электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями // Электротехническая промышленность. Сер.: Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование, 1981; —Вып. 1(73). С. 23—26.
5. Некрасов В. И., Шевцов Ю. А., Рогов А. Н. Оценка устройств импульсного регулирования напряжения по удельным показателям. // Полупроводниковая техника в устройствах электрических железных дорог: Межвуз. сб. тр.—Л., 1983. С. 33—39.
6. А. с. № 1069112 (СССР). Устройство для регулирования скорости вращения тягового электродвигателя / А. В. Плакс, А. С. Мазнёв, А. Н. Рогов, К. Н. Сусллова. —Опубл. в Б.И., 1984. № 3.

Рукопись поступила
после доработки 17. 02. 89

УДК 62-83 : 62-523.8

ЦИФРОАНАЛОГОВАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю. В. Губарь, П. Х. Коцегуб

Выполнен расчет параметров цифроаналоговой системы регулирования скорости с комбинированным управлением по задающему воздействию из условий модульного оптимума. Проведен анализ динамических свойств системы от периода квантования по времени и временного запаздывания. Показана эффективность применения комбинированного управления.

ОПЫТ промышленного использования электроприводов подчиненного регулирования показывает, что их точность и быстрдействие не всегда оказываются удовлетворительными [1]. Одним из путей улучшения этих показателей является применение цифроаналоговых систем с комбинированным управлением [2], в которых устраняется противоречие между условиями устойчивости и инвариантности ошибки регулируемой координаты от возмущающего и задающего воздействий. В цифроаналоговых системах программного управления электроприводами постоянного тока, в которых требуется обеспечить трапецеидальный или треугольный график изменения скорости двигателя с заданным ускорением, не зависящим от величины приложенного к валу двигателя статического момента, используется цифровой задатчик интенсивности (ЦЗИ). Структурная схема такой системы с цифровым ПИ-регулятором скорости приведена на рис. 1.

Цифровой задатчик интенсивности функционально можно представить в виде логического устройства (ЛУ), интегратора с передаточной функцией $D_{ин}(z)$ и сумматора. ЛУ на основании кодовой информации о величинах заданной скорости $\omega_z^* = \omega_z / \delta_\omega$ и ограничения на ускорение $\varepsilon_m^* = \varepsilon_m / \delta_\varepsilon$ формирует сигнал желаемого ускорения $\varepsilon_{ж}^* = \varepsilon_{ж} / \delta_\varepsilon$. Здесь δ_x и δ_ε — значения единиц младших разрядов кодов соответст-

вующих координат системы (шаг квантования по уровню). Цифровой интегратор преобразует $\varepsilon_{ж}^*$ в сигнал желаемой скорости $\omega_{ж}^* = \omega_{ж}/\delta_{\omega}$, а сумматор формирует результирующий сигнал задания скорости

$$\omega_{зс}^*(nT) = \omega_{ж}^*(nT) + \beta_1 T_{\mu} \frac{\delta_{\omega}}{\delta_{\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{ж}^*(nT). \quad (1)$$

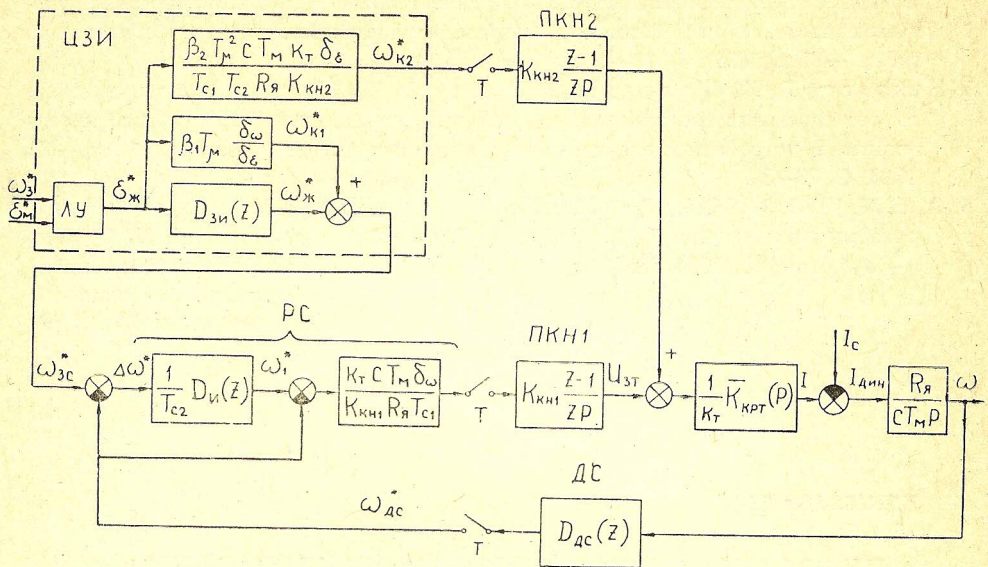


Рис. 1. Структурная схема астатической цифроаналоговой СРС с задатчиком интенсивности: ЦЗИ—цифровой задатчик интенсивности; ЛУ—логическое устройство; РС—регулятор скорости; ПКН—преобразователь код—напряжение; ДС—датчик скорости; $R_{я}$ —сопротивление якорной цепи; T_M —электромеханическая постоянная времени привода; c —постоянная двигателя; k_T —коэффициент обратной связи по току; T_{μ} —малая некомпенсируемая постоянная времени контура тока; T —период квантования по времени; β_1 и β_2 —корректирующие коэффициенты

Шаг квантования по уровню δ_{ω} выбирают по заданной точности регулирования скорости. Шаг квантования по уровню для ускорения (тока) δ_{ε} может быть определен на основании рекомендаций [3]

$$\delta_{\varepsilon} = \delta_{\omega} \cdot I_M / \Delta \omega_M,$$

где $\Delta \omega_M$ —максимальное рассогласование по скорости, при котором ток I будет равен току упора I_M .

Работу цифрового интегратора ЦЗИ целесообразно организовать таким образом, чтобы значения дискретной функции $\omega_{ж}^*(nT)$ в моменты времени nT совпадали с требуемыми значениями непрерывной функции $\omega_{ж}(t)/\delta_{\omega}$ при реализации равноускоренного (равнозамедленного) движения. Для этого интегратор должен работать по алгоритму Эйлера, то есть

$$D_{3и}(z) = \omega_{ж}^*(z) / \varepsilon_{ж}^*(z) = T / (z - 1). \quad (2)$$

Для улучшения динамических свойств системы регулирования скорости (СРС) цифровой задатчик интенсивности кроме основного сигнала $\omega_{ж}^*$ формирует также сигналы компаундирующих связей $\omega_{к1}^*$ и $\omega_{к2}^*$. Сигнал $\omega_{к2}^*$ с коэффициентом передачи

$$k_{п} = \beta_2 T_{\mu}^2 \cdot c \cdot T_M \cdot k_T \cdot \delta_{\varepsilon} / (T_{c1} \cdot T_{c2} \cdot R_{я} \cdot K_{КН2})$$

через преобразователь код—напряжение ПКН2 подается на вход аналогового контура регулирования тока (КРТ) с передаточной функцией

$$K_{КРТ}(p) = \frac{1}{k_T} \cdot K_{КРТ}(p) = \frac{1}{k_T} \cdot \frac{2\alpha^2}{(\rho + \alpha)^2 + \alpha^2}, \quad (3)$$

где $\alpha = 1/2T_{\mu}$; $K_{КН2}$ —коэффициент передачи ПКН2; T_{c1} —постоянная интегрирования внутреннего контура скорости (КРС); T_{c2} —постоянная

интегрирования внешнего КРС, совпадающая с постоянной интегрирования цифрового интегратора с передаточной функцией $D_{II}(z)$.

Для уменьшения колебательности переходных процессов по управляемому воздействию цифровой регулятор скорости РС по каналу задания реализует интегральный, а по каналу обратной связи — пропорционально-интегральный законы управления.

На структурной схеме РС представлен в виде двух частей: пропорциональной с коэффициентом усиления $K_{PC} = k_T \cdot c \cdot T_M \cdot \delta_{\omega} / K_{KH1} \cdot R_{\text{я}} \cdot T_{c1}$, и интегральной, реализующей алгоритм цифрового интегрирования с передаточной функцией

$$\frac{\omega^*_{i1}(z)}{\Delta \omega^*(z)} = \frac{1}{T_{II}} \cdot D_{II}(z),$$

где $\Delta \omega^*(nT) = \omega^*_{zc}(nT) - \omega^*_{dc}(nT)$.

В цифровых регуляторах целесообразно применять наиболее простые алгоритмы цифрового интегрирования, использующие информацию об одном, максимум двух значениях интегрируемой функции. В [4] рекомендуется в цифровом РС использовать интегратор с передаточной функцией

$$D_{II}(z) = T \cdot z / (z - 1). \quad (4)$$

В этом случае при настройке системы с датчиком мгновенного значения скорости ($D_{dc}(z) = 1$) из условий модульного оптимума постоянные интегрирования T_{c1} и T_{c2} могут быть определены из формул

$$T_{c1} = 4T_{\mu} + T + 2t_3, \quad T_{c2} = 8T_{\mu} + T + 4t_3. \quad (5)$$

При использовании дискретного датчика среднего за период T значения скорости, имеющего передаточную функцию

$$D_{dc}(z) = (z + 1)2 \cdot z; \quad T_{c1} \approx 4T_{\mu} + 2T + 2t_3; \quad T_{c2} \approx 8T_{\mu} + 2T + 4t_3. \quad (6)$$

Установка на входе САР задатчика интенсивности с компаундирующими связями позволяет повысить порядок полинома числителя передаточной функции замкнутой системы. Это создает предпосылки для улучшения качества переходных процессов, которое может быть достигнуто только при соответствующем выборе параметров β_1 и β_2 .

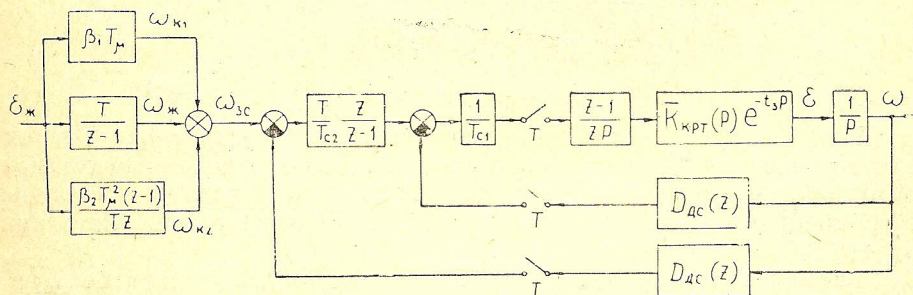


Рис. 2. Расчетная структурная схема системы регулирования скорости

Для рассматриваемого класса систем наиболее распространенным критерием оптимизации по управляемому воздействию является модульный оптимум. Расчетная структурная схема СРС представлена на рис. 2. В последней не учитывается эффект квантования по уровню и осуществлен эквивалентный структурный перенос второй компаундирующей связи со входа аналогового КРТ на вход дискретного КРС. Запаздывание $t_3 \ll T$ вносится в систему за счет времени, необходимого на реализацию алгоритма работы регулятора скорости.

Корректирующие коэффициенты β_1 и β_2 ЦЗП определим по дискретной передаточной функции системы от желаемого $\epsilon_{ж}(z)$ до дей-

сглаженного $\varepsilon(z)$ ускорения с учетом найденных параметров \hat{T}_{c1} и \hat{T}_{c2} . В случае использования измерителя мгновенного значения скорости

$$K_\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon(z)}{\varepsilon_n(z)} = \frac{b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 + b_4 z^4}{a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4 + a_5 z^5}, \quad (7)$$

где $b_0 = \gamma \cdot c_0 \cdot k_2$; $b_1 = \gamma \cdot [c_0 \cdot (1 - k_1 - 2k_2) + c_1 \cdot k_2]$; $b_2 = \gamma \cdot [c_1 \cdot (1 - k_1 - 2k_2) + c_0 \cdot (k_1 + k_2) + c_2 \cdot k_2]$; $b_3 = \gamma \cdot [c_2 \cdot (1 - k_1 - 2k_2) + c_1 \cdot (k_1 + k_2)]$; $b_4 = \gamma \cdot c_2 \cdot (k_1 + k_2)$; $\gamma = T^2 / (T_{c1} \cdot T_{c2})$; $k_1 = T_\mu \cdot \beta_1 / T$; $k_2 = (T_\mu / T)^2 \cdot \beta_2$; $c_0 = d^2 - S_1$; $c_1 = S_1 + S_2 - 2d \cdot \cos \lambda$; $c_2 = 1 - S_2$; $S_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} d \cdot d^\Delta \cdot \cos \left[(1 - \Delta) \cdot \lambda + \frac{\pi}{4} \right]$; $S_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \times \times d^\Delta \cdot \cos \left(\Delta \cdot \lambda - \frac{\pi}{4} \right)$; $d = e^{-\alpha T}$; $\Delta = 1 - \tau_3$; $\tau_3 = t_3 / T$; $\lambda = T / T_T$; $T_T = 2T_\mu$; $a_0 = -L_1 \cdot d_0$; $a_1 = L_1 \cdot (d_0 - d_1) + L_2 \cdot d_0 + d^2$; $a_5 = 1$; $a_2 = L_1(d_1 - d_2) + L_2 \cdot d_1 - 2d^2 - 2d \cdot \cos \lambda$; $a_3 = L_1 \cdot (d_2 - d_3) + L_2 d_2 + d^2 + 4d \cdot \cos \lambda + 1$; $a_4 = L_1 + d_3 + L_2 d_3 - 2 \cdot d \cdot \cos \lambda - 2$; $L_1 = T_T / T_{c1}$; $L_2 = T \cdot T_T / T_{c1} \cdot T_{c2}$; $d_0 = d^2 \cdot (1 + \lambda - \lambda \cdot \Delta) - d \cdot d^\Delta \cdot \cos[(1 - \Delta) \cdot \lambda]$; $d_1 = 2d \cdot d^\Delta \cdot \cos[(1 - \Delta) \cdot \lambda] + d^\Delta \cdot \cos(\Delta \cdot \lambda) + d^2 \cdot (\Delta \lambda - 1) - 2d(1 + \lambda - \lambda \Delta) \cdot \cos \lambda$; $d_2 = 1 + \lambda - \lambda \cdot \Delta - 2 \cdot d \cdot (\lambda \cdot \Delta - 1) \cdot \cos \lambda - d \times \times d^\Delta \cdot \cos[(1 - \Delta) \cdot \lambda] - 2d^\Delta \cdot \cos(\Delta \cdot \lambda)$; $d_3 = d^\Delta \cdot \cos(\Delta \cdot \lambda) + \Delta \cdot \lambda - 1$.

Воспользовавшись первыми двумя уравнениями оптимизации по модульному оптимуму [5] применительно к передаточной функции (7), получаем формулы для определения коэффициентов β_1 и β_2 :

$$\left. \begin{aligned} 0,25(T_\mu/T)^4 \beta_1^4 + (T_\mu/T)^2 \beta_1^2 (0,5 \cdot q_1 - 0,5 \cdot p - 0,25) + 0,25 \cdot q_1^2 + \\ + 0,5 \cdot q_1 p + p_1 - 0,75 \cdot p^2 - q_2 = 0; \\ \beta_2 = 0,5[\beta_1^2 - \beta_1 \cdot T/T_\mu + (q_1 - p)(T/T_\mu)^2], \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{R} (c_0 c_1 + c_1 c_2 + 4c_0 c_2); \quad p_1 = \frac{1}{R} (c_0 \cdot c_2); \\ q_1 &= S_{a1} \cdot T_{c1}^2 \cdot T_{c2}^2 / R \cdot T^4; \quad q_2 = S_{a2} \cdot T_{c1}^2 \cdot T_{c2}^2 / R \cdot T^4; \\ S_{a1} &= A_1 + 4A_2 + 9A_3 + 16A_4 + 25 \cdot A_5; \\ S_{a2} &= A_2 + 6 \cdot A_3 + 20A_4 + 50A_5; \\ A_i &= \sum_{l=i}^5 a_l \cdot a_{l+i}, \quad i=1, 2, \dots, 5; \quad R = (c_0 + c_1 + c_2)^2. \end{aligned}$$

Можно показать, что при использовании дискретного датчика среднего значения скорости, формулы (8) для определения коэффициентов β_1 и β_2 остаются теми же. Изменяются только значения коэффициентов a_i в передаточной функции (7) системы регулирования скорости.

Графики зависимостей $\beta_1(T/T_\mu, \tau_3)$ и $\beta_2(T/T_\mu, \tau_3)$ построенные с использованием найденных формул, представлены на рис. 3а, б (сплошные линии справедливы для системы с датчиком мгновенного, штрихпунктирные — с датчиком среднего значения скорости). Из графиков видно, что при $T \rightarrow 0$ и $\tau_3 \rightarrow 0$ $\beta_1 = 4,75$ и $\beta_2 = 11,3$, которые совпадают с величинами, полученными при оптимизации аналогичной непрерывной системы [6].

Исследование переходных процессов рассмотренной системы проводилось на ЦВМ с использованием метода пространства состояний по методике, приведенной в [7].

Графики зависимостей $t_c/T_\mu \cdot (T/T_\mu, \tau_3)$ и $t_m/T_\mu \cdot (T/T_\mu, \tau_3)$, построенные по результатам моделирования, приведены на рис. 4а, б. Здесь t_c — время первого согласования тока якоря двигателя со своим уста-

новившимся значением; t_m — время достижения током максимального значения. Перерегулирование по току мало зависит от периода квантования T (0 ... 20 мс), величин T_p (4 ... 10 мс), τ_3 (0 ... 1), типа датчика скорости и наличия компаундирующих связей и составляет примерно 4 ... 7%.

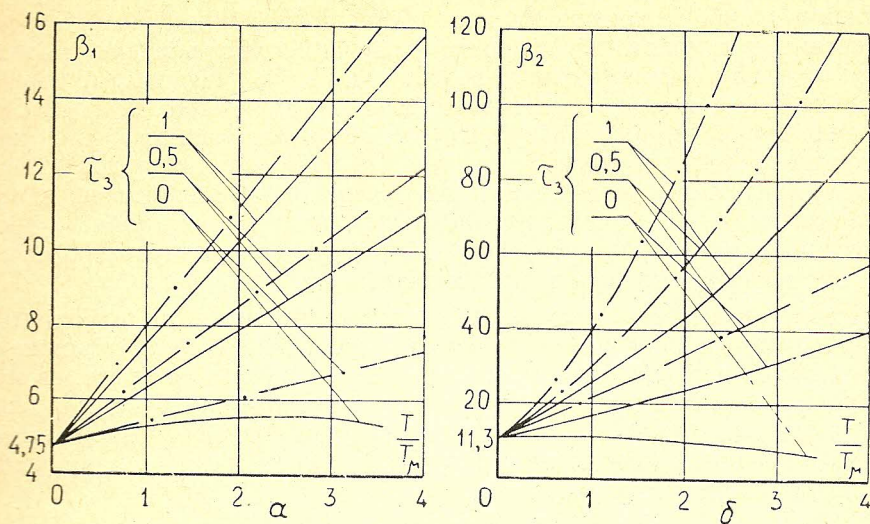


Рис. 3. Графики зависимостей; а— $\beta_1(T/T_p, \tau_3)$, б— $\beta_2(T/T_p, \tau_3)$

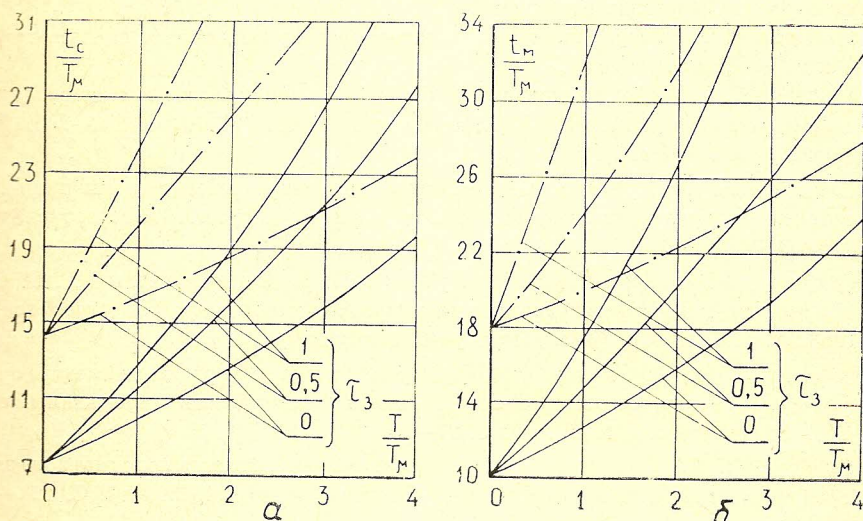


Рис. 4. Графики зависимостей: а— $t_c/T_p \cdot (T/T_p, \tau_3)$; б— $t_m/T_p \cdot (T/T_p, \tau_3)$; — — — управление по отклонению; — — — комбинированное управление

Анализ графиков рис. 4 позволяет сделать следующие выводы:

1. В рассмотренной цифроаналоговой системе регулирования скорости квантование по времени и запаздывание приводят к ухудшению ее динамических свойств. Исследования показали, что аналогичное явление имеет место и при переходе от дискретного датчика мгновенного к дискретному датчику среднего значения скорости.

2. В системе с комбинированным управлением при выборе параметров компаундирующих связей из условий модульного оптимума удается существенно повысить ее быстродействие по сравнению с СРС, работающей только по отклонению ($\beta_1 = \beta_2 = 0$). Так, например, при

$T/T_{\mu}=2$ и $\tau_3=0,5$ $t_c=26T_{\mu}$ в СРС, работающий по отклонению, и $t_c=16,2T_{\mu}$ —в СРС с комбинированным управлением. Установлено, что в СРС с комбинированным управлением уменьшается также и максимально возможная ошибка воспроизведения заданного закона движения.

В заключение рассмотрим вопрос об устойчивости цифроаналоговой системы регулирования скорости в зависимости от величин периода квантования T и временного запаздывания t_3 . Увеличение периода T может, например, потребоваться с целью повышения точности измерения скорости вращения двигателя при ограниченном числе импульсов на оборот импульсного датчика [8]. Воспользовавшись аналитическим критерием устойчивости Шур-Кона [9] применительно к (7) с использованием ЦВМ было установлено, что при настройке параметров дискретного регулятора скорости из условий модульного оптимума, система устойчива при любых значениях T и $t_3 \leq 1$.

Использование рассмотренной системы управления эффективно для приводов, работающих от задатчиков интенсивности в напряженном повторно-кратковременном режиме, в частности для приводов механизмов обжимных прокатных станов, быстродействие которых является одним из факторов, влияющих на производительность. Цифроаналоговая система может быть реализована средствами современной микропроцессорной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Решмин Б. И., Ямпольский Д. С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов.—М.: Энергия, 1975. 184 с.
3. Радимов С. Н. Выбор рациональных параметров при анализе и синтезе цифро-Киев: Техніка. 1966. 512 с.
3. Радимов С. Н. Выбор рациональных параметров при анализе и синтезе цифровых регуляторов скорости. //Электромеханика, 1982. № 2. С. 202—206. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Коцегуб П. Х., Губарь Ю. В. Синтез комбинированной системы позиционного электропривода с цифровым ИП-регулятором скорости. //Электромеханика, 1985. № 3. С. 103—111. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Коцегуб П. Х., Колчев Е. В., Губарь Ю. В., Светличный А. В. Синтез дискретных систем управления по модульному оптимуму. //Электромеханика, 1983. № 3. С. 9—13. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Коцегуб П.Х., Толочко О. И. Оптимизация систем управления электроприводами с задатчиками интенсивности. //Электротехническая промышленность. Сер.: Электропривод, 1976. № 7. С. 22—25.
7. Коцегуб П. Х., Губарь Ю. В. Цифроаналоговая система позиционного электропривода с задатчиком положения. //Электромеханика, 1983. № 1. С. 123—128. (Изв. высш. учеб. заведений).
8. Иванов Г. М., Левин Г. М., Хуторецкий В. М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока.—М.: Энергия, 1978. 160 с.
9. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования.—М.: Физматгиз, 1963. 199 с.

Рукопись поступила
14. 03. 88