

ТОКООГРАНИЧЕНИЕ В АСТАТИЧЕСКИХ ПО НАГРУЗКЕ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ СОСТОЯНИЯ

Мариничев В.Ю.

Донецкий национальный технический университет
vik@elf.dgtu.donetsk.ua

Subject of article are the thesis of current saturation in continuous and discrete systems of speed control with a proportional speed regulator, in which the feedback by dynamic current, restored with the state observer, has been realized for given to system an astatic properties by load

Улучшение динамики астатических по нагрузке систем подчинённого регулирования (СПР) с двигателями постоянного тока независимого возбуждения посвящено много работ. Их сущность состоит в том, что в непрерывной СПР в контуре регулирования тока обратная связь по току заменена на обратную связь по динамическому току, выделенному наблюдателями состояния (НС). Последние отличаются друг от друга в основном сигналом управления. Что касается сигнала, по которому осуществляется контроль работы НС, то обычно используется скорость двигателя. В [1] предложены НС с управлением от выходного сигнала задатчика интенсивности, в [2] – от выхода регулятора скорости (РС), которые легко перестраиваются на управление от сигнала, поступающего на вход регулятора тока (РТ), в [3] – от тока якоря двигателя.

В [1, 2, 3] показаны преимущества астатических по нагрузке систем регулирования скорости с пропорциональным регулятором скорости (П-РС) и обратной связью по восстановленному при помощи НС динамическому току в контуре регулирования тока (КРТ) перед типовыми астатическими по нагрузке СПР с пропорционально-интегральными регуляторами скорости (ПИ-РС). Однако в публикациях не обсуждаются вопросы токоограничения. Только один из возможных способов его для непрерывных систем рассмотрен в [2]. Вопросы токоограничения в аналогичных системах с прямым цифровым управлением [4, 5], также не затрагивались.

По этой причине ниже рассматривается проблема токоограничения как в непрерывных, так и в дискретных системах с П-РС и КРТ, в котором обратная связь по току осуществляется по восстановленной при помощи НС динамической составляющей тока.

Непрерывные системы регулирования

Упрощённая структурная схема непрерывных систем с П-РС и обратной связью по динамическому \bar{I}_j , восстановленному при помощи НС, представлена на рис. 1. На рис. 1 не показана обратная связь по ЭДС двигателя, которая для большинства систем не оказывает существенного влияния на динамику привода.

В схеме использована следующая система относительных единиц (о.е.):

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_0, \quad \bar{I} = I / I_{K3}, \quad \bar{E}_\Pi = E_\Pi / U_H, \quad \bar{U}_Y = U_Y / (k_\Pi U_H), \quad \bar{U}_{3T} = U_{3T} / (k_T I_{K3}), \quad \bar{U}_{3C} = U_{3C} / (k_C \omega_0),$$

где: ω_0 – скорость идеального холостого хода двигателя; U_H, I_H – номинальные значения напряжения, тока якоря двигателя; I_{K3} – ток короткого замыкания; k_Π – коэффициент передачи тиристорного преобразователя; k_T, k_C – коэффициенты обратных связей по динамическому току и по скорости.

На схеме рис. 1 использованы также следующие обозначения: T_π – электромагнитная постоянная времени якорной цепи ТП-Д; T_M – электромеханическая постоянная времени привода; T_μ – малая не компенсируемая постоянная времени контура тока, отнесенная к ТП; T_T, T_C – постоянные времени интегрирования разомкнутых контуров динамического тока и скорости.

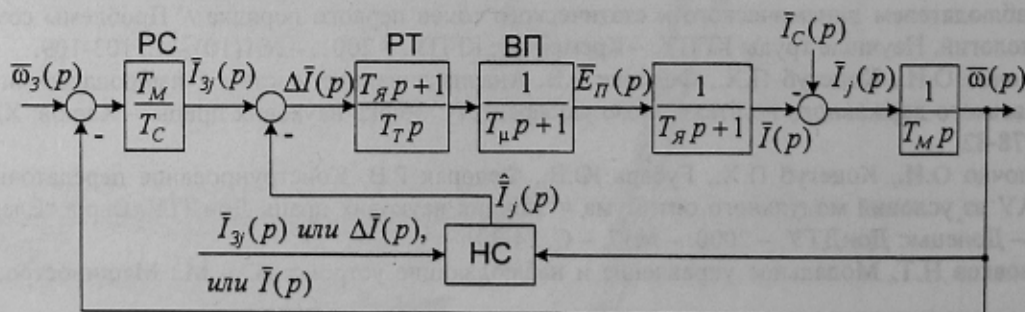


Рисунок 1 – Упрощённая структурная схема непрерывных систем с П-РС и обратной связью по динамическому \bar{I}_j , восстановленному при помощи НС

В обычных СПР, в которых КРТ замкнут по полному току якоря двигателя, токоограничение осуществляется ограничением выходного сигнала \bar{I}_3 регулятора скорости, являющегося заданием на КРТ. Так как в системе с НС обратная связь по току заменена обратной связью по его динамической составляющей \hat{I}_j , то ограничение выходного сигнала РС обеспечивает ограничение не полного тока якоря двигателя, а его динамической составляющей.

Этот недостаток можно устранить, применяя переключающиеся обратные связи по току [2, 6], как показано на рис. 2.

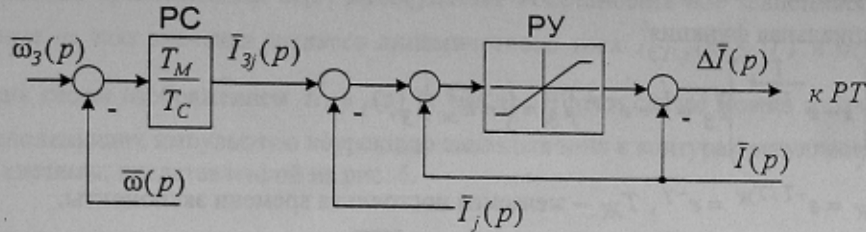


Рисунок 2 – Схема, поясняющая работу узла токоограничения в системе с обратной связью по оценке динамического тока

В нормальном режиме положительная обратная связь по току \bar{I} , которая заведена на разделительный усилитель (РУ) с единичным коэффициентом усиления компенсирует действие отрицательной обратной связи по току и работа системы с разделительным усилителем не отличается от работы системы рис. 1. В режиме токоограничения РУ насыщен и КРТ поддерживает ток на допустимом уровне, как в обычных СПР скорости.

Следует отметить, что в системе, представленной на рис. 1 и дополненной РУ для осуществления режима токоограничения, регулирование ускорения (замедления) привода можно осуществить уставкой ограничения выходного сигнала РС. Заданное значение скорости $\bar{\omega}_3$ к системе прикладывается скачком. При этом темпы нарастания тока на начальных участках ускорения и замедления привода определяются динамическими свойствами КРТ, они значительно выше темпов изменения токов (примерно в 2 раза) на участках окончания процессов ускорения и замедления, которые определяются динамическими свойствами контура регулирования скорости (КРС). Иначе при таком способе регулирования ускорения (замедления) быстродействие привода выше, чем когда эта функция возложена на задатчик интенсивности (ЗИ) формирующей желаемое изменение скорости $\bar{\omega}_3$, а изменение тока определяется динамическими свойствами КРС.

Цифровые системы управления

Рассматривается система прямого цифрового управления вентильным электроприводом постоянного тока с пропорциональным регулятором скорости, внутренним контуром регулирования тока и наблюдателями состояния, идентифицирующими статические и динамические моменты двигателя. Оценки этих моментов используются для того, чтобы сделать систему астатической по нагрузке.

Структурная схема такой системы регулирования скорости (СРС) без наблюдателя состояния и учёта влияния обратной связи по ЭДС двигателя в относительных единицах ($\bar{x} = x/x_g$) приведена на рис. 3.

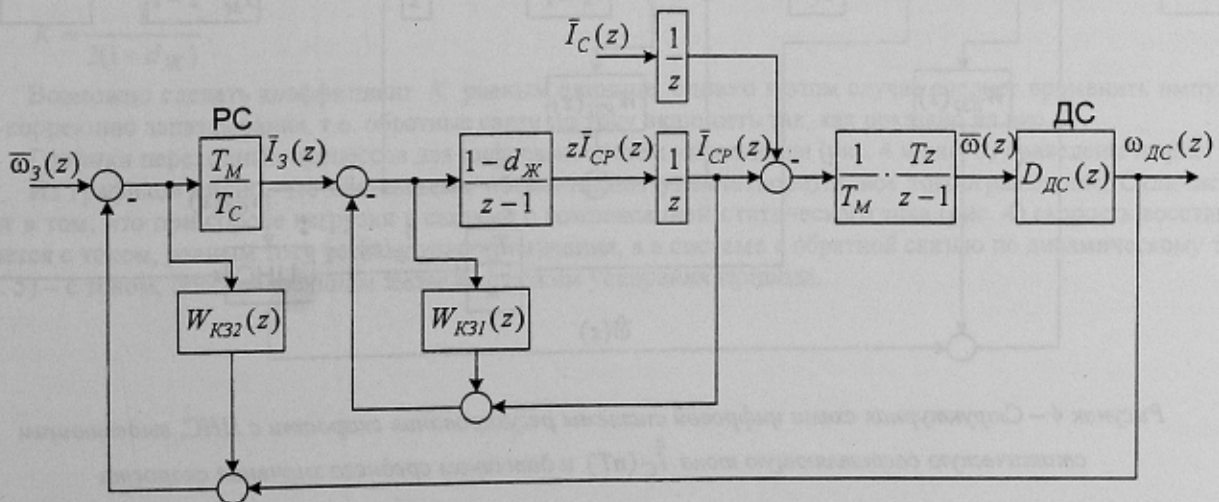


Рисунок 3 – Структурная схема цифровой СРС

При нормировании структурной схемы использованы следующие базовые величины: $\omega_0 = \omega_0$ – скорость идеального холостого хода двигателя; $I_0 = I_{K3}$ – ток короткого замыкания разомкнутой системы вентильный преобразователь-двигатель.

КРТ замкнут по среднему за период дискретности T значению тока якоря I_{CP} . Разомкнутая часть контура представлена в свёрнутом виде в предположении, что вентильный преобразователь из-за организации цифрового управления вентилями представляет собой идеальный импульсный элемент и вносит в прямую часть КРТ запаздывание на такт T [7], а регулятор тока настроен в соответствии с методикой, согласно которой в качестве желаемой реакции контура на скачок задания \bar{I}_3 при отсутствии запаздывания (или его компенсации) принята экспоненциальная функция

$$\bar{I}_{CP}(kT) = \left(1 - e^{-\frac{T}{T_{Ж}}k}\right) \bar{I}_3 = (1 - e^{-\gamma k}) \bar{I}_3 = (1 - d_{Ж}^k) \bar{I}_3, \quad (1)$$

где $\gamma = T/T_{Ж}$; $d_{Ж} = e^{-T/T_{Ж}} = e^{-\gamma}$, $T_{Ж}$ – желаемая постоянная времени экспоненты.

С возрастанием величины γ быстрдействие как КРТ, так и системы в целом, повышается. Однако увеличение γ больше двух не дает ощутимого результата.

Компенсация запаздывания в КРТ и в КРС возложена на импульсную коррекцию запаздывания с помощью звеньев с передаточными функциями $W_{K31}(z)$ и $W_{K32}(z)$, выражения для которых приведены в [7, 8].

В цифровых системах автоматического регулирования возможно применение как датчиков мгновенного $\bar{\omega}(nT)$, так и датчиков среднего за период квантования значений скорости $\bar{\omega}_{CP}(nT)$. Эти координаты используются в качестве обратных связей не только для замыкания типовой дискретной системы, представленной на рис. 3, но и в качестве сигналов, по которым осуществляется контроль работы цифровых наблюдателей состояния (ЦНС). Следует отметить, что динамические свойства систем при замыкании по мгновенному значению скорости $\bar{\omega}(nT)$ лучше, чем при замыкании по среднему значению скорости $\bar{\omega}_{CP}(nT)$ [4]. Учитывая, что астатической по нагрузке систему можно получить не только заменой обратной связи по току $\bar{I}(nT)$ её динамической составляющей $\bar{I}_j(nT)$, но также за счёт компенсации статического момента (тока). В [5] предложены ЦНС, управляемые средним значением тока якоря двигателя $\bar{I}_{CP}(nT)$ и выделяющих статическую составляющую тока $\hat{I}_C(nT)$ при контроле работы ЦНС по мгновенному значению скорости $\bar{\omega}(nT)$ и выделяющих статическую составляющую тока $\hat{I}_C(nT)$ и мгновенное значение скорости $\hat{\omega}(nT)$ при контроле работы наблюдателя по среднему значению скорости $\bar{\omega}_{CP}(nT)$. Структурная схема такой системы с датчиком среднего значения скорости приведена на рис. 4.

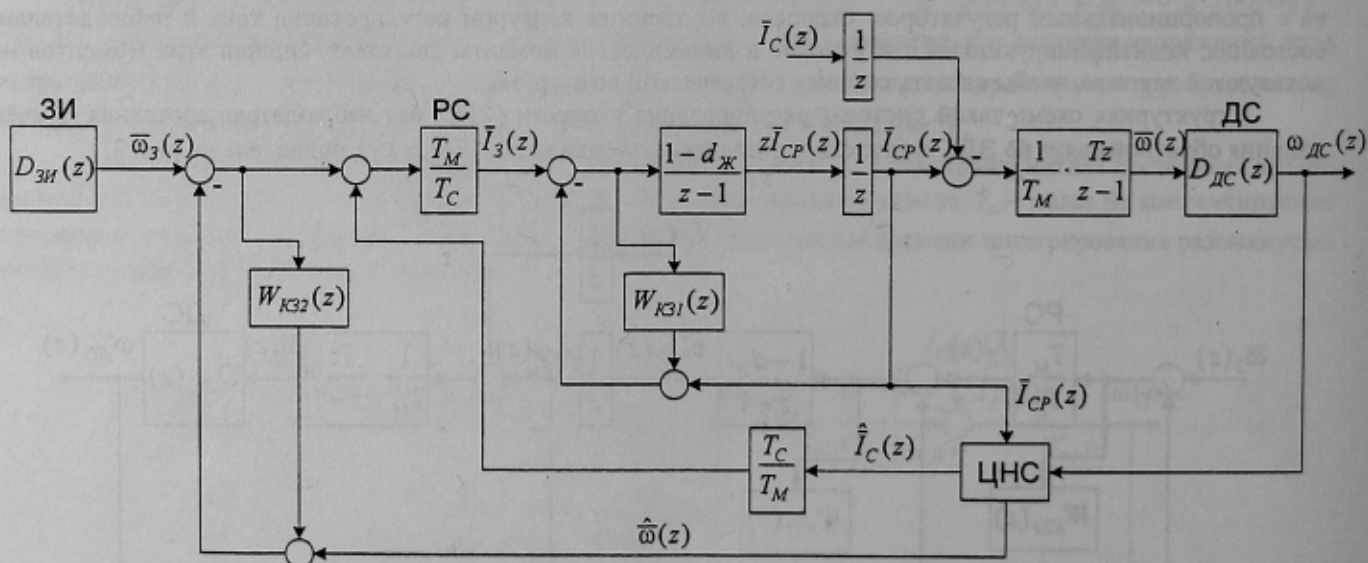


Рисунок 4 – Структурная схема цифровой системы регулирования скорости с ЦНС, выделяющим статическую составляющую тока $\hat{I}_C(nT)$ и датчиком среднего значения скорости

Тогда подав на вход РС (см. рис. 4) восстановленное значение статического тока $\hat{I}_C(nT)$ с коэффициентом передачи T_C/T_M и применив обратную связь по мгновенному значению скорости $\hat{\omega}(nT)$ при использовании датчика мгновенного значения скорости или по восстановленному ЦНС мгновенному значению скорости $\hat{\omega}(nT)$ при использовании датчика среднего значения скорости добиваемся не только астатических свойств систем по нагрузке, но и достаточно простого ограничения тока якоря двигателя за счёт ограничения выходного сигнала РС. Следует также отметить, что в системе приведенной на рис. 4 сигнал задания скорости $\hat{\omega}_3$ формируется задатчиком интенсивности.

При использовании предложенных в [5] ЦНС удаётся восстановить вне зависимости от типа датчика скорости упреждённые на такт значения среднего динамического тока $\hat{I}_{CP,J}(nT+1T)$ и мгновенной скорости $\hat{\omega}(nT+1T)$, имеющих своим изображением $z\hat{I}_{CP,J}(z)$ и $z\hat{\omega}(z)$. В этом случае можно избавиться от корректирующих звеньев, выполняющих импульсную коррекцию запаздывания в контурах регулирования и предложить структурную схему системы, представленной на рис. 5.

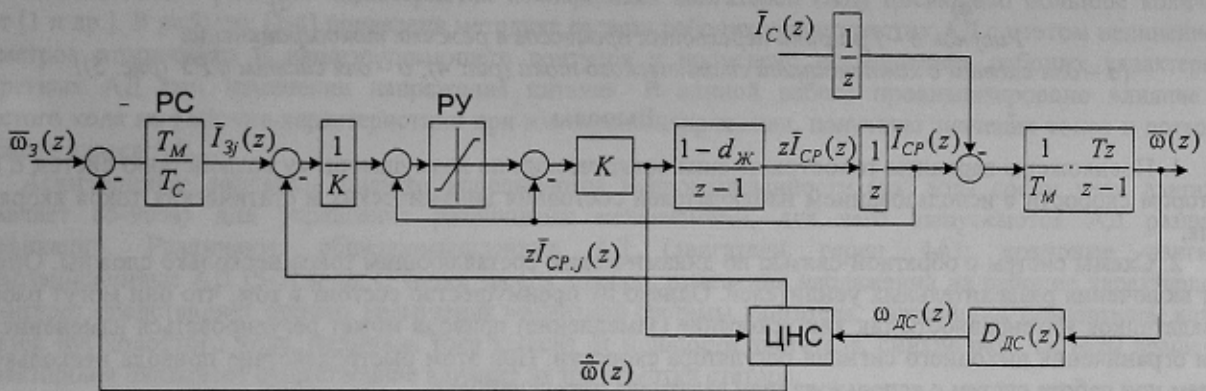


Рисунок 5 – Структурная схема цифровой СПР скорости

В отличие от схем, рассмотренных в [4], они дополнены разделительным усилителем РУ с коэффициентом передачи, равным единице, ограниченном на уровне допустимого тока якоря двигателя, и компенсирующими друг друга при работе РУ на линейном участке характеристики положительной и отрицательной обратными связями. В этой связи в нормальном режиме токовый контур замкнут по упреждённому на такт среднему динамическому току $\hat{I}_{CP,J}$ и работа такой системы не отличается от той, которая исследована в [4] без узла, обеспечивающего ограничение тока якоря двигателя.

Звено с коэффициентом усиления $K < 1$ включено для уменьшения в режиме токоограничения (РУ насыщен) колебательности переходных процессов тока, обусловленных влиянием запаздывания в контуре регулирования тока. Если задаться небольшим перерегулированием по току при набросе нагрузки, превышающей допустимое значение, то коэффициент K можно рассчитать из условия обеспечения модульного оптимума. Можно показать, что при этом он должен быть равен

$$K = \frac{1}{3(1-d_{ж})}. \quad (2)$$

Возможно сделать коэффициент K равным единице, однако в этом случае следует применить импульсную коррекцию запаздывания, т.е. обратные связи по току включить так, как показано на рис. 3.

Графики переходных процессов для цифровых систем управления (рис. 4 и рис. 5) приведены на рис. 6.

Из графиков видно, что обе системы обеспечивают удовлетворительное токоограничение. Отличие состоит в том, что при сбросе нагрузки в системе с компенсацией статического тока (рис. 4) скорость восстанавливается с током, равным току уставки токоограничения, а в системе с обратной связью по динамическому току (рис. 5) – с током, обеспечивающим желаемый режим ускорения привода.

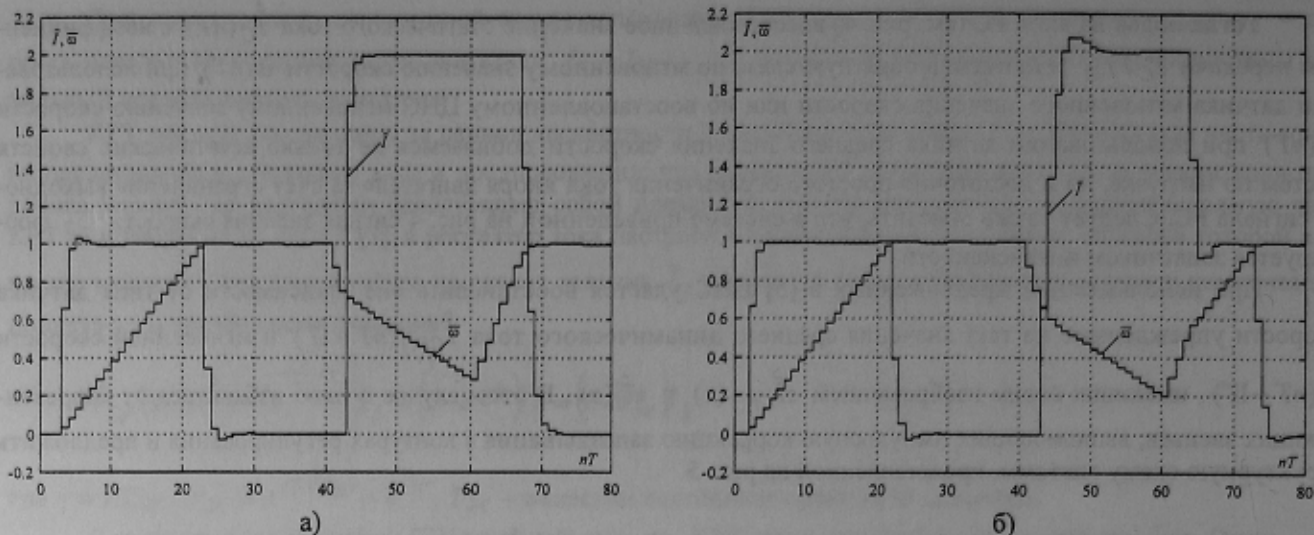


Рисунок 6 – Графики переходных процессов в режиме токоограничения
(а – для систем с компенсацией статического тока (рис. 4), б – для систем с РУ (рис. 5))

Выводы

1. Предложены варианты токоограничения астатических по возмущающему воздействию систем с П регулятором скорости с использованием наблюдателей состояния динамических и статических токов якоря двигателя.

2. Схемы систем с обратной связью по динамическим составляющим токов несколько сложны. Они требуют включения разделительных усилителей. Однако их преимущество состоит в том, что они могут работать без задатчиков интенсивности так как ускорение (замедление) привода может регулироваться изменением уставки ограничения выходного сигнала регулятора скорости. При этом быстродействие привода несколько выше, чем при работе систем с использованием задатчика интенсивности.

3. Системы с компенсацией статического момента за счёт подачи дополнительного сигнала на вход регулятора скорости от наблюдателей статического тока проще. Однако они требуют применения задатчиков интенсивности с вытекающими последствиями относительно быстродействия приводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния. – Харьков, ХГПУ, 1998. – 117 с.
2. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Воронцов Д.В., Коломиец С.В. Упрощенный наблюдатель состояния систем подчиненного регулирования постоянного тока // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, вып.4. - Донецк: ДонГТУ, 1999, с.36-41.
3. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю., Розкарьяк П.И. Система подчиненного регулирования скорости с наблюдателем динамического и статического токов первого порядка // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Выпуск 1/2001(10) - Кременчуг: КГПУ, 2001. - С.103-109.
4. Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Толочко О.И., Мариничев В.Ю. Выбор параметров и исследование астатических цифровых систем подчиненного регулирования скорости с наблюдателем состояния // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія "Електромеханіка, електроніка і електропривод". Збірки наукових праць. Тематичний випуск 10. - Харків, НТУ ХПІ, 2001. - С.55-57.
5. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю. Цифрові ідентифікатори статичного моменту, керовані цифровим давачем струму // „Електроінформ” (офіційне видання української асоціації інженерів-електриків”, 2002, №1. – С. 17-18.
6. Синтез вентильних приводів постійного струму: Навч. посібник/Коцегуб П.Х.–Київ, ІЗМН, 1997.–122с.
7. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
8. П.Х. Коцегуб. Компенсация запаздывания в контуре регулирования скорости системы вентильного привода с прямым цифровым управлением // Изв. вузов. Электромеханика. 1997. № 3., с. 55 – 58.