

УДК 681.515

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF DIGITAL CONTROLLERS IN THE BLDC CONTROL SYSTEM

А. Н. Русакович,

инженер-конструктор I категории СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», аспирант кафедры БГУИР

A. Rusakovich

Дата поступления в редакцию — 26.10.2015 г.

В статье приведены результаты исследования эффективности работы различных цифровых корректирующих устройств в составе системы управления вентильным двигателем при вариации параметров. Для проведения сравнительного анализа предложено использовать модификацию комплексного показателя качества, который является универсальным критерием оценки, сочетает в себе различные критерии качества и позволяет их учитывать с различными весовыми коэффициентами, что делает оценку качества систем автоматического управления более гибкой и эффективной. Даны практические рекомендации по использованию исследованных корректирующих устройств при проектировании современных цифровых систем управления.

This article presents findings of investigation for various digital controllers performance during variation of plant parameters. These controllers were investigated in the BLDC control system. For the comparative analysis author offered to use modified versatility performance index that is a universal criterion of evaluation and combines different performance criteria. The index allows considering of these criteria with different weight factors that make control system performance evaluation more flexible and effective. The author offered practical guidelines for using investigated controllers during modern digital control system designing.

Введение.

При проектировании систем автоматического управления (САУ) обычно руководствуются условием удовлетворения заданному комплексу технических требований. Эти требования могут быть различными: от вида переходных характеристик, точности, быстродействия, до весовых, габаритных, энергетических характеристик и т. д. В целях обеспечения необходимых значений показателей качества осуществляется проектирование вспомогательных устройств с определенной структурой и параметрами — корректирующих устройств (КУ, регуляторов). Синтез КУ для САУ — одна из важ-

нейших задач, изучаемых теорией управления. Развитие средств вычислительной техники, особенно микропроцессоров и микро-ЭВМ, послужило основой широкого распространения цифровых систем управления, и соответственно, цифровых КУ. В настоящее время практически все популярные КУ реализованы в цифровом виде или имеют дискретные аналоги. Выбор регулятора, обеспечивающего требуемое качество работы системы, является сложной задачей для разработчика, для решения которой необходимо не только исследовать применение различных КУ, но и осуществить качественное сравнение их работы. В рамках данной статьи осуществить

синтез и качественное сравнение всех существующих КУ практически невозможно, поэтому в дальнейшем будут рассмотрены ПИД-регулятор [1, 2], оптимальный цифровой регулятор [3, 4], регулятор с нечеткой логикой функционирования [5, 6] и регулятор, включенный параллельно единичной обратной связи (ОС) [7].

Синтез цифровых регуляторов.

ПИД-регулятор — наиболее распространенный регулятор в управлении процессами и сервомеханизмами. Данный регулятор вырабатывает выходной сигнал, являющийся суммой трех составляющих: пропорционального регулирования $u_p(t)$, регулирования по интегралу $u_i(t)$ и регулирования по производной $u_d(t)$. При определении коэффициентов ПИД-регулятора обычно исходят из критериев качества и ограничений, возлагаемых на кривую реакции системы, например, на количество колебаний, величину перерегулирования при колебательном переходном процессе [4]. Для настройки значений коэффициентов ПИД-регулятора существует множество различных методов, наиболее распространенным из которых является метод Зиглера — Никольса [2]. Следует отметить, что данный метод дает только приближенные значения коэффициентов и не позволяет получить параметры ПИД-регулятора, обеспечивающие эффективную работу САУ. Поэтому его обычно используют лишь для определения начальных значений коэффициентов. Дальнейшая настройка может производиться вручную или с применением численных методов настройки и оптимизации [2]. В данной работе окончательная настройка коэффициентов будет проведена с помощью расширения *Simulink Design Optimization* [8] пакета прикладных программ *MATLAB*, которое содержит инструменты динамической оптимизации параметров проектируемых систем управления [5, 8].

Оптимальный цифровой регулятор (ОЦР) позволяет при ступенчатом входном воздействии и нулевых начальных условиях выполнить оптимальный переходной процесс без перерегулирования за конечное минимальное время [3, 4]. Данное утверждение справедливо для объектов управления (ОУ) с вырожденным полиномом в числителе передаточной функции. В случае, когда полином числителя не вырожденный (например, ОУ имеет форсирующее звено), ОЦР

при типовом возмущении и нулевых начальных условиях обеспечит переходной процесс на выходе системы за минимальное время, но перерегулирование этого переходного процесса может быть любым, в зависимости от параметров ОУ [9]. Принцип работы ОЦР состоит в том, что цифровой регулятор рассматривается как усилитель с переменным коэффициентом усиления, принимающим различные значения на разных интервалах прерывания квантователя. В литературе [3] изложено проектирование САУ с цифровыми регуляторами на основе табулированных передаточных функций оптимальных по быстродействию регуляторов. Составленные таблицы позволяют для заданного воздействия на входе системы и передаточной функции линейного ОУ определить оптимальную передаточную функцию цифрового регулятора и оптимальное управляющее воздействие на входе ОУ. Следует заметить, что определение передаточных функций регуляторов для систем с ОУ высоких порядков является трудоемкой задачей, поэтому в [3] определены передаточные функции регуляторов для многих, но не для всех ОУ. Вместе с тем в работе [10] предлагается метод автоматизированного синтеза ОЦР на основе дискретных передаточных функций ОУ, позволяющий определить передаточную функцию регулятора для ОУ любого вида.

Регулятор с нечеткой логикой функционирования (нечеткий регулятор, НР) осуществляет процесс выработки управляющих воздействий на базе нечеткой логики. НР включает три основных блока — фаззификации, формирования логического решения и дефаззификации [6]. В блоке фаззификации входные лингвистические переменные (ошибка θ системы, скорость $\dot{\theta}$ и ускорение $\ddot{\theta}$ изменения ошибки) качественно характеризуются терм-множествами, которые описываются на универсальном множестве U функциями принадлежности (ФП) $\mu(u)$. Диапазоны изменения входных переменных и текущие значения входных переменных затем пересчитываются на универсальное множество U [5]. В блоке формирования логического решения на основе матрицы знаний записываются лингвистические правила вида «ЕСЛИ — ТО», которые затем обрабатываются с формированием результирующей ФП, необходимой для расчета выходной величины НР [5]. Блок дефаззификации преобразует полученную результирующую ФП

в числовую величину — управляющее воздействие для ОУ. Синтез НР удобно осуществлять в пакете расширения *Simulink* пакета *MATLAB*, который содержит необходимые блоки для моделирования работы данного регулятора. В этом случае основной задачей является выбор значений входных $A = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$; $B = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$; $C = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$ и выходного $D = m_{\max} = -m_{\min}$ сигналов. В работе [5] предлагается осуществлять настройку коэффициентов A, B, C, D по аналогии с ПИД-регулятором — с помощью расширения *Simulink Design Optimization*.

Принцип работы цифрового регулятора, включенного параллельно единично ОС (цифровой регулятор с гибкой ОС, ЦРГОС), основан на использовании свойств гибкой обратной связи, проектирование которой решается в рамках ограничений на частоту среза контура управления объекта, содержащего жесткую ОС [7]. В процессе синтеза данного регулятора для ОУ, замкнутого единичной ОС, необходимо повысить быстродействие прямой цепи системы, скорректировать вид переходного процесса и реализовать регулятор в цифровом виде. Быстродействие САУ повышается путем включения в прямую цепь дополнительного усилителя. Для коррекции вида переходного процесса замкнутой системы определяется структура передаточной функции корректирующей обратной связи и рассчитываются ее параметры [7]. Заключительным этапом синтеза является реализация регулятора в цифровом виде. Для этого можно использовать различные методы дискретизации передаточных функций, в том числе и автоматизированные [10].

Независимо от вида цифрового регулятора, для его работы в составе САУ необходимо определить шаг квантования h . При выборе шага квантования h требуется учитывать ряд противоречивых требований и следовать рекомендациям [3, 4, 11]. Практически установлено, что эффект квантования по времени мало отражается на динамике цифровой САУ, если выбирать шаг квантования h из соотношения $T_{95} / 45 < h < T_{95} / 15$, где T_{95} — время достижения выходным сигналом системы уровня 95 % от установившегося значения при подаче на вход ступенчатого сигнала. Обычно выполняется условие $T_{95} \approx 3T$, где T — наибольшая постоянная времени ОУ [10].

Рассмотрим синтез выбранных КУ для системы управления вентильным электроприводом.

В настоящее время вентильный электропривод находит все более широкое применение в различных САУ и является перспективным. Передаточная функция объекта управления имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{K(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{s(T_3 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

где $K = 66,113 \text{ с}^{-1}$; $T_1 = 0,0132 \text{ с}$; $T_2 = 0,0116 \text{ с}$; $T_3 = 0,4 \text{ с}$; $\xi_1 = 0,35$; $\xi_2 = 0,21$.

Синтез выбранных корректирующих устройств для ОУ (1) был осуществлен с использованием среды моделирования *MATLAB/Simulink* и моделей регуляторов, которые можно найти в литературе [5, 6, 7, 10]. В результате проведения настройки были определены коэффициенты для ПИД-регулятора: $k_p = 45,011$; $k_i = 0,0001$; $k_d = 1,034$; $h = 0,001 \text{ с}$; для ОЦР: $K_0 = 9,4568$; $-1,7971$; $b_2 = 1,1360$; $b_3 = -0,8008$; $b_4 = 0,4619$; $k_1 = 0,4097$; $k_2 = 0,3703$; $k_3 = 0,0646$; $k_4 = 0,1554$; $h = 0,01 \text{ с}$; для нечеткого регулятора: $A = 3600$; $B = 120\,000$; $C = 637\,880\,000$; $D = 690\,000$; $h = 0,001 \text{ с}$ и для ЦРГОС: $a_1 = 0,2222$; $a_2 = 0,0123$; $b_1 = -1,9027$; $b_2 = 0,9027$; $K_0 = 22,0884$, $h = 0,001 \text{ с}$. После синтеза различных корректирующих устройств, необходимо осуществить проверку и сравнительный анализ качества их работы.

Сравнительный анализ качества работы цифровых регуляторов.

Для выбора наиболее эффективного корректирующего устройства необходимо оценить эффективность работы САУ с данными регуляторами. Для этого в теории ТАУ принято использовать различные критерии [12]: оценка с помощью прямых показателей качества, интегральный, квадратичный и др. Однако применение данных критериев не всегда является эффективным и достаточным. Так, прямые показатели качества позволяют оценить эффективность работы системы лишь по какому-то одному критерию, а при использовании интегральных оценок невозможно определить, все ли требования по качеству работы выполняются. Более гибким и универсальным можно считать комплексный показатель качества (КПК). Сущность КПК раскрыта в работах [13, 14], где предлагается оценивать работу любой САУ с помощью выражения:

$$PI' = \frac{k}{C_1\sigma + C_2t_n + C_3t_{nm} + C_4e_c}, \quad (2)$$

где σ — максимальное перерегулирование; t_n — время достижения максимальной величины перерегулирования; t_{nm} — время переходного процесса; e_c — статическая ошибка; $k, C_1 \dots C_4$ — масштабирующие коэффициенты.

Выражение (2) сочетает в себе различные критерии качества и позволяет их учитывать с различными весовыми коэффициентами, что делает оценку качества САУ более гибкой. Вместе с тем, выбор масштабирующих коэффициентов является неясным и поэтому выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$PI = k_1 \frac{p_1}{p_{10}} + k_2 \frac{p_2}{p_{10}} + \dots + k_n \frac{p_n}{p_{n0}}, \quad (3)$$

где $k_1 \dots k_n$ — весовые коэффициенты; $p_1 \dots p_n$ — показатели качества; $p_{10} \dots p_{n0}$ — желаемые (требуемые) показатели качества.

В данном выражении коэффициенты $k_1 \dots k_n$ являются весовыми и выбираются таким образом,

чтобы выполнялось условие $\sum_{i=1}^n k_i = 1$. При этом в качестве величин $p_1 \dots p_n$ выбираются те показатели, которые важны для проектируемой системы. В качестве желаемых показателей качества можно выбрать произвольные значения (в таком случае они будут масштабирующими коэффициентами) или задать требуемые техниче-

ским заданием параметры (в таком случае КПК позволяет оценить качество работы САУ по отношению к требуемым параметрам). Минимальное значение функционала (3) показывает максимальное качество работы САУ и наоборот.

Для исследования синтезированных регуляторов в составе САУ были выбраны следующие показатели качества: статическая ошибка e_c ; время переходного процесса t_{nm} и максимальное перерегулирование σ . Следовательно, выражение (3) примет вид:

$$PI = k_1 \frac{\sigma}{\sigma_0} + k_2 \frac{t_{nm}}{t_{nm0}} + k_3 \frac{e_c}{e_{c0}}. \quad (4)$$

Для исследования зададимся следующими значениями желаемых показателей качества: $\sigma_0 = 30\%$; $t_{nm0} = 1$ с; $e_{c0} = 0,01$ град и $k_1 = k_2 = k_3 = 0,3333$.

Для анализа эффективности САУ с различными КУ, с помощью выражения (4) исследовалась зависимость качества работы САУ от изменения коэффициента усиления K_{OU} (1), постоянной времени T_3 наиболее инерционного звена, амплитуды X_{BX} входного ступенчатого сигнала. При этом параметры изменялись в 10 раз в одну и другую сторону.

Результаты исследования зависимости $PI = f(X_{BX})$ приведены на рис. 1 (в относительных единицах — о. е.), где $X_{BX} = 1$ о. е. соответствует амплитуде 1 град; $PI = 1$ о. е. соответствует качеству работы с желаемыми показателями $\sigma_0, t_{nm0}, e_{c0}$.

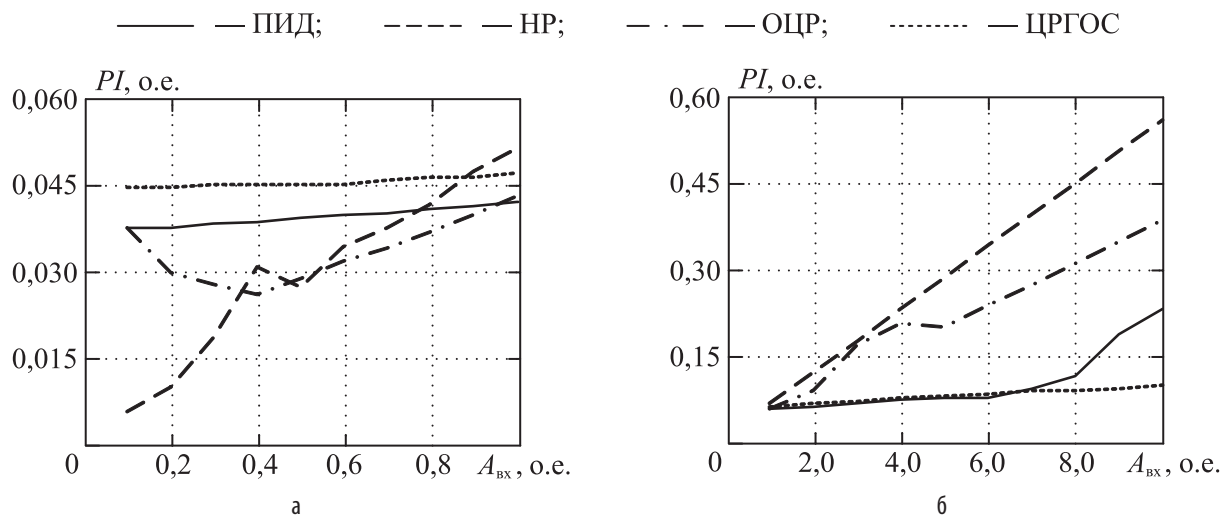


Рис. 1. Зависимость КПК от изменения амплитуды входного сигнала
а — $X_{BX} = 0,1 \dots 1$ о. е.; б — $X_{BX} = 1 \dots 10$ о. е.

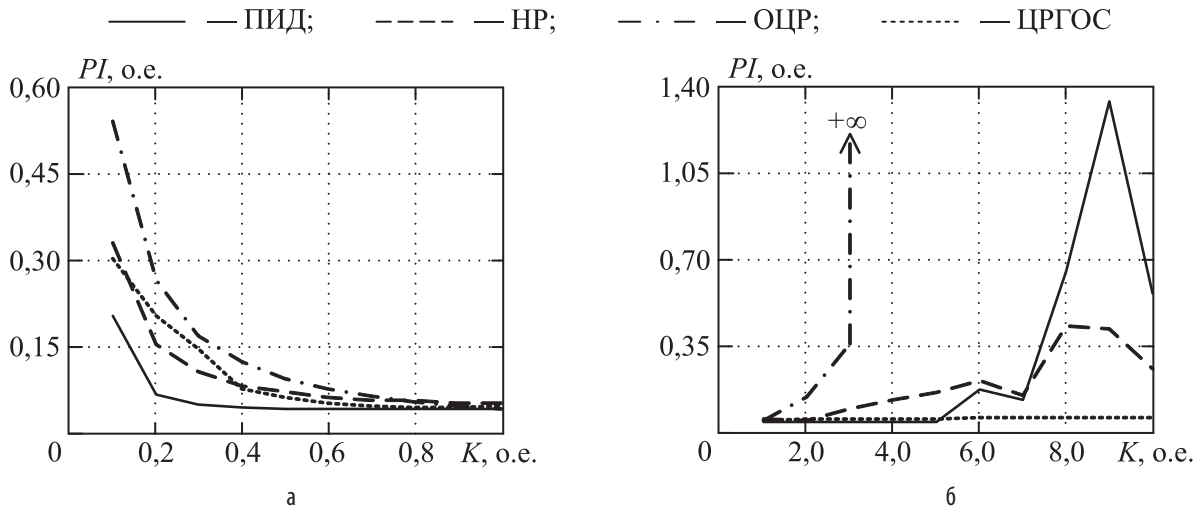


Рис. 2. Зависимость КПК от изменения коэффициента усиления ОУ
 а — $K = 0,1 \dots 1$ о.е.; б — $K = 1 \dots 10$ о.е.

Из приведенных характеристик видно, что лучшее качество работы при амплитудах входного сигнала $X_{BX} < 1$ град обеспечивает НР, а худшее — ЦРГОС, при этом ОЦР и ПИД-регулятор обеспечивают средние показатели качества. В то же время при обработке входных сигналов большой амплитуды нечеткий регулятор показывает наименьшую эффективность, а наиболее эффективным КУ является ЦРГОС.

Результаты исследования зависимости $PI = f(K)$ приведены на рис. 2. Исследование

проводилось для амплитуды входного сигнала $X_{BX} = 1$ град.

Анализируя характеристики (см. рис. 2), можно сделать следующие выводы. ПИД-регулятор обеспечивает лучшее качество работы при уменьшении коэффициента усиления, однако, при увеличении K в 7 и более раз качество работы значительно падает. Следовательно, если в ОУ возможно изменение коэффициента усиления в сторону увеличения, то производить настройку ПИД-регулятора желательно на увеличенный K , что обеспечит более

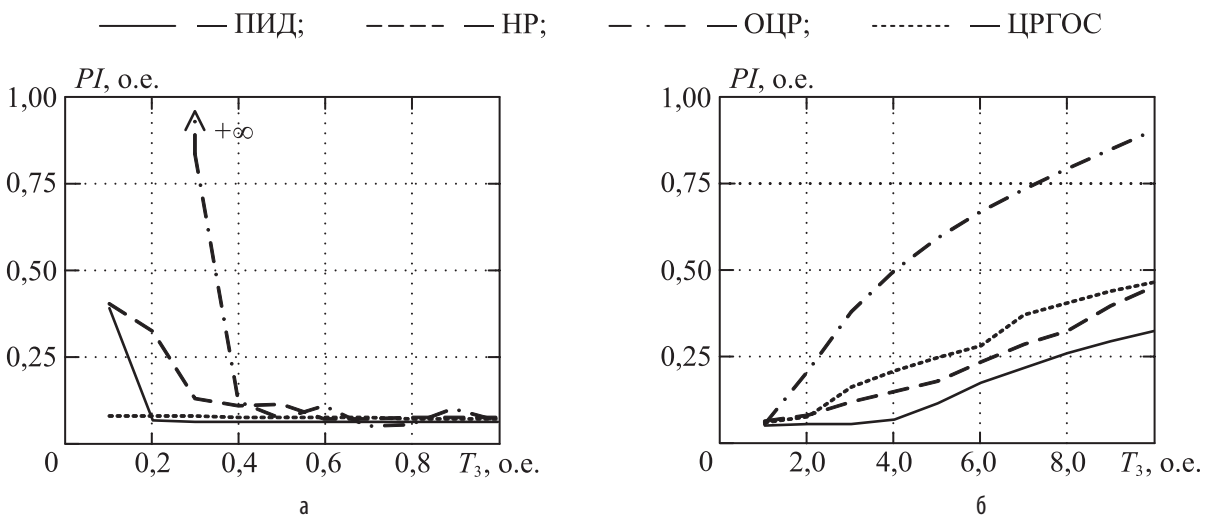


Рис. 3. Зависимость КПК от изменения постоянной времени T_3
 а — $T_3 = 0,1 \dots 1$ о.е.; б — $T_3 = 1 \dots 10$ о.е.

высокое качество работы САУ. НР обеспечивает приемлемое качество на всем диапазоне характеристики, что позволяет говорить о его низкой чувствительности к изменению коэффициента передачи ОУ. ОЦР показывает худшее качество работы при уменьшении K , а при увеличении усиления более чем в 3 раза — приводит к неустойчивости САУ. ЦРГОС практически нечувствителен к увеличению коэффициента усиления ОУ, при этом обеспечивая приемлемое качество работы при уменьшении K .

Результаты исследования зависимости $PI = f(T_3)$ приведены на рис. 3. Исследование проводилось для амплитуды входного сигнала $X_{вх} = 1$ град.

Из графиков (см. рис. 3) видно, что ПИД-регулятор, НР и ЦРГОС обладают схожей чувствительностью к изменению постоянной времени T_3 , в то время как ОЦР обеспечивает худшее качество работы САУ при увеличении постоянной времени, а в случае уменьшения T_3 в 3 и более раз приводит к неустойчивости САУ. Это позволяет сделать вывод о том, что при возможном изменении постоянных времени ОУ для коррекции САУ следует использовать ПИД-регулятор, НР или ЦРГОС.

В итоге можно отметить следующее. ПИД-регулятор обеспечивает приемлемое качество при отработке входных сигналов различной амплитуды. При этом качество работы САУ с ПИД-регулятором значительно ухудшается в случае увеличения коэффициента усиления ОУ. Изменение постоянной времени ОУ в сторону уменьшения слабо влияет на эффективность работы ПИД-регулятора, за исключением уменьшения T_3 в 10 раз: при этом значение КПК возрастает более чем в 4 раза. При синтезе ПИД-регулятора обычно проводится настройка его коэффициентов с помощью различных оптимизаторов, следовательно, поведение данного регулятора может изменяться в зависимости от заданного критерия оптимизации. ПИД-регулятор достаточно прост для синтеза и реализации, и его можно рекомендовать к применению при условии обеспечения требуемых характеристик САУ.

Регулятор с НЛФ показывает максимальную эффективность при отработке системой воздействий малой амплитуды, однако качество его работы уменьшается пропорционально увеличению амплитуды входного сиг-

нала. При вариации коэффициента усиления или постоянных времени ОУ, нечеткий регулятор показывает достаточно высокую эффективность работы, что дает возможность рекомендовать его к применению при возможном изменении параметров ОУ в процессе эксплуатации. Следует отметить, что применение НЛФ делает данный регулятор очень гибким, и его поведение сильно зависит от применяемой базы правил. Составление эффективной базы правил — сложная и трудоемкая задача, решить которую может только специалист высокого уровня. При работе НР также выполняются сложные вычисления, что требует применения высокопроизводительных микроконтроллеров или микро-ЭВМ.

ОЦР обеспечивает среднюю эффективность работы при отработке ступенчатых сигналов различной амплитуды. Данный регулятор также обладает достаточно высокой чувствительностью к изменению параметров ОУ: при увеличении коэффициента усиления или при уменьшении постоянной времени более чем в 3 раза ОЦР приводит к неустойчивости САУ. Вместе с тем, как было отмечено ранее, ОЦР обеспечивает оптимальный вид переходного процесса и максимальное быстродействие только для ОУ с вырожденным полиномом в числителе передаточной функции. В случаях, когда передаточная функция ОУ включает в себя форсирующие звенья, возникает перерегулирование, величина которого зависит от параметров ОУ. Таким образом, рекомендуется использовать ОЦР в первую очередь для ОУ, не содержащих форсирующих звеньев: в таком случае данный регулятор может обеспечить переходной процесс с максимальным быстродействием и без перерегулирования. В случае, когда передаточная функция ОУ имеет невырожденный полином в числителе, применение данного типа регуляторов для коррекции нежелательно.

Применение ЦРГОС обеспечивает лучшее качество работы при отработке сигналов большой амплитуды, вместе с тем его эффективность при отработке малых входных воздействий достаточно низкая. Однако поведение данного регулятора также зависит от выбора критерия оптимизации при финальной настройке его коэффициентов. ЦРГОС обладает очень низкой чувствительностью к изменению

параметров ОУ, что также дает возможность рекомендовать его к применению для коррекции ОУ с изменяющимися параметрами. Синтез и реализация ЦРГОС достаточно проста, как и в случае ПИД-регулятора, что позволяет использовать его при проектировании САУ при условии обеспечения требуемых характеристик системы.

Заключение.

Исходя из результатов проведенных исследований, можно сделать следующие выводы. При синтезе систем автоматического управления необходимо выбирать корректирующие устройства, обеспечивающие требуемые показатели качества работы САУ. Для этого, после определения структуры и расчета коэффициентов регуляторов, необходимо проводить качественное сравнение их работы. В качестве критерия эффективности при проведении сравнительного анализа предлагается использовать комплексный показатель качества. Данный функционал сочетает в себе различные критерии качества и позволяет их учитывать с различными весовыми коэффициентами, что делает оценку качества САУ более гибкой и эффективной. При выборе в качестве желаемых показателей качества требуемых техническим заданием параметров, КПК позволяет оценить соответствие качества работы САУ техническому заданию.

Исследованные корректирующие устройства обеспечивают разную эффективность работы, в зависимости от изменяемого параметра объекта управления. Приведенные в статье рекомендации позволяют выбрать более эффективный регулятор, в зависимости от предъявляемых требований, и могут быть использованы при проектировании современных цифровых систем управления.

Литература:

1. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. — 616 с.
 2. Astrom, K. J. PID Controllers: Theory, Design and Tuning / K. J. Astrom, T. Hagglund. — 2nd edition. — North Carolina: ISA, 1995. — 337 p.

3. Гостев, В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник / В. И. Гостев, В. К. Стеклов. — К.: Радиоаматор, 1998. — 704 с.
 4. Гостев, В. И. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления параметрами теплоэнергетических объектов / В. И. Гостев, В. В. Крайнев, С. Н. Скуратов. — К.: Техника, 2007. — 356 с.
 5. Стрижнев, А. Г. Применение цифровых регуляторов в канале регулирования потокосцепления ротора в системе векторного управления / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник // Информатика. — 2011. — № 2(30). — С. 124-133.
 6. Гостев, В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В. И. Гостев. — СПб.: БВХ-Петербург, 2011. — 416 с.
 7. Стрижнев, А. Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А. Г. Стрижнев, М. К. Хаджинов, А. Н. Русакович // Доклады БГУИР. — 2014. — № 4(82). — С. 80-86.
 8. Simulink Design Optimization: Getting Started Guide [Electronic resource] / Mathworks. — Natick, 2015. — Mode of access: http://cn.mathworks.com/help/pdf_doc/slido/slido_gs.pdf. — Date of access: 24.07.2015.
 9. Гостев, В. И. Передаточные функции оптимальных цифровых регуляторов для систем управления, объекты которых включают форсирующие звенья / В. И. Гостев, А. Г. Дрезналь // Кибернетика и вычисл. техника. — 1989. — № 83. — С. 22-28.
 10. Стрижнев, А. Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов на основе дискретных передаточных функций объектов управления / А. Г. Стрижнев, А. Н. Русакович // Информатика. — 2013. — № 3(39). — С. 105-114.
 11. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
 12. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. — 656 с.
 13. Eksin, I. Optimum setting of PID parameters via hybrid global optimization method in speed control of an induction machine / I. Eksin, M. Gokasan, M. Demiroz // Turkish Journal of Electric Engineering & Computer Science. — 1995. — № 3(2-3). — P. 74-83.
 14. Evaluation of the Performance of Various Fuzzy PID Controller Structures on Benchmark Systems / B. Akbiyik [et al.] // 4rd International Conf. on Electrical and Electronics Engineering. — Bursa, 2005. — P. 388-393.