Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-7>
УДК 621.681.516

А.М. Ханнанов, К.В. Чупина, В.К. Усольцев

ХАННАНОВ АНДРЕЙ МУСАВИРОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: hanr@mail.ru
ЧУПИНА КИРА ВЛАДИМИРОВНА – к.т.н., доцент, e-mail: chupina.kv@dvfu.ru
УСОЛЬЦЕВ ВАЛЕРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: usvalerij@yandex.ru
Кафедра судовой энергетики и автоматики Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Повышение астатизма системы автоматического управления путем введения положительной обратной связи

Аннотация: Подчиненные системы автоматического управления (САУ) широко используются в технике, в том числе в судовых энергетических установках. Необходимость ограничения параметров объекта управления, таких как синхронный генератор или судовой электроприбор, делает их нелинейными. Применение пропорционально-интегральных регуляторов создает проблему «интегрального насыщения», возникновения свободных движений в САУ при сходе регуляторов с ограничения. Авторами предлагается повысить астатизм САУ и решить проблему «интегрального насыщения» путем введения дополнительной положительной обратной связи с выхода объекта управления в пропорциональный канал регулятора. Эффективность таких САУ исследовалась нами с помощью анализа математических моделей нелинейных САУ и их цифрового моделирования. Результаты исследования: описана математическая модель одного из контуров САУ с дополнительной положительной обратной связью. Доказано, что введение такого вида связи позволяет увеличить астатизм САУ и исключить эффект «интегрального насыщения» при астатизме первого порядка, что повышает точность САУ при отработке управляющих сигналов. Предложен новый способ исключения эффекта «интегрального насыщения» в широкодиапазонных регуляторах напряжения судовых синхронных генераторов промышленных систем освещения без применения аппаратных защитных средств. Таким образом, доказана эффективность введения дополнительной положительной обратной связи на увеличение точности САУ и исключения эффекта «интегрального насыщения». Отмечена низкая чувствительность эффекта введения положительной обратной связи к изменению параметров САУ.

Ключевые слова: система автоматического управления, подчиненное регулирование, насыщение регулятора, положительная обратная связь, математическая модель, астатизм.

Введение

Часто система автоматического управления (САУ) судовыми объектами управления реализуется в виде подчиненного регулирования с несколькими вложенными контурами. Каждый контур синтезируется как астатическая САУ конкретной координаты. Астатизм достигается введением в регулятор интегратора [1, 2, 5, 8], однако это может привести к нежелательным свободным движениям в САУ, если регулятор ограничивает свою выходную координату (эффект интегрального насыщения) [2, 4, 6] и значительно затягивает переходной

процесс при сходе с ограничения [1, 7, 8]. В некоторых системах [8] и электроприводах, а также в регуляторах напряжения синхронных генераторов [3] для повышения точности САУ вводятся слабые положительные обратные связи. Однако проблема «интегрального насыщения» решается не алгоритмически, а аппаратными средствами [1, 4, 8].

Исходя из этого, мы в настоящем исследовании предприняли попытку достичь эффекта астатизма без введения интегратора в регулятор за счет положительной обратной связи (ОС) и одновременно решить проблему «интегрального насыщения». Проверка ожидаемого эффекта решалась путем математического моделирования

Материалы и методы

Проанализируем математическую модель нелинейной САУ на примере одного из ее контуров.

Структура одноконтурной САУ с предлагаемым алгоритмом управления и эффективным астатизмом второго порядка приведена на рис. 1.

Рис. 1. Регулятор САУ с положительной обратной связью.

K_{OC} – коэффициент положительной ОС, K_p – коэффициент усиления регулятора, T_p – постоянная времени регулятора, s – оператор преобразования Лапласа, u – задающий сигнал САУ, f – возмущающее воздействие, Y_p – выходная координата регулятора, X_0 – внутренняя координата регулятора, Y_0 – выходная координата объекта управления.

Объект управления описывается передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{K_{oy}}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)}, \quad (1)$$

где K_{oy} – коэффициент усиления объекта управления (ОУ);
 T_1 – компенсируемая постоянная времени ОУ;
 T_2 – некомпенсируемая (малая) постоянная времени ОУ.
 Коэффициент положительной ОС выбирается из условия

$$K_{OC} K_{oy} = 1. \quad (2)$$

Передаточная функция объекта управления $W_1(s) = \frac{Y_0(s)}{X_p(s)}$, охваченного положительной ОС, при выполнении условия (2) приобретет вид:

$$W_1(s) = \frac{W_o(s)}{1 - K_{OC} \cdot W_o(s)} = \frac{K_{oy}}{1 - K_{oy} K_{OC} + (T_1 + T_2) \cdot s + T_1 T_2 s^2} = \frac{K_{oy} / (T_1 + T_2)}{s \cdot (1 + s \cdot T_2 / (1 + T_2 / T_1))}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при выполнении условия $K_{OC} K_{oy} = 1$, передаточная функция объекта управления, охваченного положительной ОС, состоит из интегрирующего и апериодического звена. Следует отметить, что постоянная времени апериодического звена в выражении (3) меньше постоянной T_2 .

Для получения астатизма второго порядка регулятор внешнего контура должен быть пропорционально-интегральным с передаточной функцией

$$W_p(s) = K_p + \frac{1}{T_p s} = \frac{1 + K_p \cdot T_p \cdot s}{T_p \cdot s}. \quad (4)$$

Для доказательства устойчивости регулятора с положительной ОС выполним эквивалентное преобразование структуры (рис. 1).

Рисунок 2 демонстрирует: пока выполняется условие $K_p - K_{oc} > 0$, объект управления охвачен результирующей отрицательной ОС. Оценим изменение поведения САУ, если условие (2) нарушено. На рис. 3 приведены переходные характеристики замкнутой САУ при различных условиях. Параметры САУ: $T_1=1$ с; $T_2=0,2$ с; $K_{oy}=5$; $K_{oc}=0,2$; $K_p=0,75$; $T_p=10$ с. Исходное перерегулирование составляет 10%. При $K_{oc}K_{oy}>1$ перерегулирование увеличивается, а при $K_{oc}K_{oy}<1$ – уменьшается. Для сравнения приведена переходная характеристика САУ с астатизмом второго порядка без положительной ОС. В САУ компенсируется постоянная времени T_1 , обеспечивается 10% перерегулирования, $K_p=0,7$; $T_p=8$ с. Переходный процесс в САУ без ОС затянут, так как уравнение (3) показывает, что при положительной ОС не только компенсируется постоянная времени T_1 , но уменьшается значение малой (некомпенсируемой) постоянной времени.

Рис. 2. Преобразованная структура САУ с положительной ОС.

Рис. 3. Переходные характеристики замкнутой САУ:
1 – при выполнении условия $K_{oc}K_{oy} = 1$; 2 – при $K_{oc}K_{oy} = 1,25$; 3 – при $K_{oc}K_{oy} = 0,75$;
4 – для САУ без положительной ОС.

В структуре рис. 1 положительной ОС охвачен объект управления, однако положительную ОС можно использовать в регуляторе (рис. 4).

Рис. 4. САУ с регулятором, использующим положительную ОС.

Регулятор включает модель объекта управления с передаточной функцией $W_M(s)$, для общности добавлен нелинейный элемент НЭ, который учитывает реальное ограничение выходной координаты регулятора (управляющего воздействия на объект управления).

Определим передаточную функцию части регулятора, охваченного положительной ОС, без учета нелинейного элемента. Пусть передаточная функция модели соответствует передаточной функции объекта управления, описываемой уравнением (1):

$$W_M(s) = \frac{K_M}{(1 + T_{1M} \cdot s) \cdot (1 + T_{2M} \cdot s)} \quad (5)$$

Передаточная функция регулятора $W_P(s) = Y_P(s)/u(s)$, при условии $K_M K_{OC} = 1$, примет вид

$$\begin{aligned} W_P(s) &= \frac{K_P}{1 - K_{OC} \cdot W_M(s)} = \frac{(1 + T_{1M} \cdot s) \cdot (1 + T_{2M} \cdot s) \cdot K_P}{1 - K_M K_{OC} + (T_{1M} + T_{2M}) \cdot s + T_{1M} T_{2M} s^2} = \\ &= \frac{(1 + T_{1M} \cdot s) \cdot (1 + T_{2M} \cdot s) \cdot K_P / (T_{1M} + T_{2M})}{s \cdot (1 + s \cdot T_{2M} / (1 + T_{2M} / T_{1M}))} \end{aligned} \quad (6)$$

Передаточная функция (6) соответствует передаточной функции пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. Главным достоинством такого регулятора является одинаковое изменение координат объекта управления и координат модели при выходе регулятора на ограничение [3, 6]. Эта особенность обеспечивает отсутствие свободных движений, ухудшающих переходный процесс, при выходе регулятора из ограничений.

На рис. 5 приведены переходные характеристики САУ с астатизмом первого порядка при различных управлениях и различных структурах регулятора. Параметры объекта управления: $K_O = 1,0$; $T_I = 1,0$ с; $T_2 = 0,2$ с. Параметры регулятора с моделью объекта: $K_M = 1,0$; $T_{1M} = 1,0$ с; $T_{2M} = 0,2$ с; $K_{OC} = 1,0$; $K_P = 5$. Параметры ПИ-регулятора: $K_P = 3,636$; $T_P = 0,275$ с.

Рис. 5. Переходные характеристики САУ:
выход объекта управления – 1 и выход регулятора – 2 при задающем сигнале $u = 0,2$;
выход объекта управления – 3 и выход регулятора – 4 при задающем сигнале $u = 0,5$
для регулятора с моделью; выход объекта управления – 5 и выход регулятора – 6
при задающем сигнале $u = 0,5$ для ПИ-регулятора.

Перерегулирование линейных САУ (ограничение выхода регулятора не достигалось) составило 10%, а при ограничении выхода регулятора с моделью объекта – 4,5%. Это обусловлено ограничением входного сигнала объекта управления

Перерегулирование при ограничении выхода ПИ-регулятора с параллельными каналами составило 20%, что определяется свободными движениями интегратора регулятора после схода с ограничения.

Рассмотрим влияние возмущения на поведение САУ. Структура САУ с ПИ-регулятором приведена на рис. 6

Рис. 6. Структура САУ для возмущающего воздействия без положительной ОС.

Передаточная функция, соответствующая рис. 6, для возмущающего воздействия:

$$W_f(s) = \frac{Y_O(s)}{f(s)} = \frac{\frac{s}{K_P}}{1 + \left(\frac{1 + T_1 \cdot K_P \cdot K_{OY}}{K_P \cdot K_{OY}} \right) \cdot s + \left[\frac{T_1 + T_2}{(K_P \cdot K_{OY})} \right] \cdot s^2 + \frac{T_1 \cdot T_2}{(K_P \cdot K_{OY})} \cdot s^3} \quad (7)$$

Структура САУ с П-регулятором приведена на рис. 7:

Рис. 7. Структура САУ с П-регулятором и положительной ОС для возмущающего воздействия.

Структуре рис. 7 соответствует передаточная функция

$$W_{Pf}(s) = \frac{Y_O(s)}{f(s)} = \frac{\frac{K_{OY}}{1 + K_{OY} \cdot (K_P - K_{OC})}}{1 + \left[\frac{(T_1 + T_2)}{[1 + K_{OY} \cdot (K_P - K_{OC})]} \right] \cdot s + \left[\frac{(T_1 \cdot T_2)}{[1 + K_{OY} \cdot (K_P - K_{OC})]} \right] \cdot s^2} \quad (8)$$

Структура САУ с ПИ-регулятором приведена на рис. 8.

Рис. 8. Структура САУ с ПИ-регулятором и положительной ОС для возмущающего воздействия.

Структуре рис. 8 соответствует передаточная функция:

$$W_{PI}(s) = \frac{Y_O(s)}{f(s)} = \frac{\frac{s}{K_P}}{1 + \left[\frac{1 + K_{OY} \cdot (K_P \cdot T_P - K_{OC})}{(K_{OY} \cdot K_P)} \right] \cdot s + \left[\frac{(T_1 + T_2)}{(K_{OY} \cdot K_P)} \right] \cdot s^2 + \frac{(T_1 \cdot T_2)}{(K_{OY} \cdot K_P)} \cdot s^3} \quad (9)$$

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) для передаточных функций по возмущению, соответствующие передаточным функциям (7)–(9), приведены на рис. 9. Параметры САУ выбраны по условию одинакового перерегулирования 10% при ступенчатом изменении управления.

Параметры объекта управления: $T_1 = 1$ с, $T_2 = 0.2$ с, $K_{OY} = 1$, $K_{OC} = 1$.
 Параметры ПИ-регулятора в САУ без положительной ОС: $K_P = 3.6$ с⁻¹, $T_P = 1$ с.
 Параметры П-регулятора в САУ с положительной ОС: $K_P = 6.0$.
 Параметры ПИ-регулятора в САУ с положительной ОС: $K_P = 0.4$ с⁻¹, $T_P = 10$ с.

Рис. 9. ЛАЧХ передаточных функций по возмущению:
 1 – для САУ с ПИ-регулятором без положительной ОС; 2 – для САУ с П-регулятором и с положительной ОС; 3 – для САУ с ПИ-регулятором и с положительной ОС.

Рисунок 9 показывает, что введение положительной обратной связи увеличивает чувствительность САУ к возмущениям в области низких частот, что является недостатком применения положительной обратной связи.

Применение регулятора с положительной ОС рассмотрим на примере синтеза САУ широкодиапазонного регулирования напряжения судового синхронного генератора (СГ) типа МСК-103-4.

Широкодиапазонное регулирование напряжения (ШДРН) СГ рыбопромыслового судна потребовалось при питании от специально выделенного СГ сайрового освещения. При ловле сайры используется специальное освещение с глубоким регулированием светового потока, что требует изменения напряжения, подаваемого на сайровые люстры, от номинального до 0,3 номинального напряжения.

Номинальное линейное напряжения СГ типа МСК-103-4 400 В, номинальный ток при активной номинальной сайровой нагрузке 360 А. На рис. 10 приведена структура САУ СГ.

СГ является нелинейным объектом управления, что связано с насыщением его магнитной системы. Автором [3] предложена нелинейная структура, соответствующая СГ при работе на сайровое освещение (рис. 11).

Зависимость коэффициента обратной связи U_{OC} от напряжения СГ U_G в относительных единицах определяется следующим выражением:

$$U_{OC}(U_G) = \frac{a_0 U_G}{1 - a_1 U_G}, \text{ где } a_0 = 0.16, a_1 = 0.841. \quad (10)$$

Рис. 10. Структура САУ широкодиапазонного регулирования напряжения СГ:
 РН – нелинейный регулятор напряжения; ШИМ – широтно-импульсный модулятор;
 ПАФК – управляемая система возбуждения с прямым амплитудно-фазным
 компаундированием; ИПН – измерительный преобразователь напряжения;
 ОУ – часть САУ, являющаяся объектом управления.

Рис. 11. Нелинейная структура СГ, работающего на сайровое освещение.

В качестве базовых величин принято: напряжение СГ – 400 В, а регулятора – 6 В. Аналитическое выражение для регулировочной характеристики имеет вид

$$U_G(U_P) = \frac{U_P}{a_0 + a_1 U_P}. \quad (11)$$

Неуправляемость в зоне минимальных напряжений СГ обусловлена наличием генератора начального возбуждения, обеспечивающего начальное напряжение СГ около 80 В.

Регулировочная характеристика СГ с системой ПАФК (рис. 12) сугубо нелинейная, а дифференциальный коэффициент передачи во всем диапазоне изменяется почти в тридцать раз. Изменяется и постоянная времени СГ, что видно на переходных характеристиках СГ с системой ПАФК, представленных на рис. 13.

Рис. 12. Абсолютная регулировочная характеристика СГ с системой ПАФК

Рис. 13. Переходные характеристики СГ с системой ПАФК при изменении напряжения управления: 1 – от 0 до 1,2 В (20%); 2 – от 1,2 до 2,4 В (20÷40%); 3 – от 2,4 до 6 В (40÷100%).

Предложенная структура регулятора с положительной ОС и моделью объекта управления, приведенная на рис. 4, позволяет синтезировать работоспособную САУ широкодиапазонного регулирования напряжения СГ. Модель СГ с системой ПАФК реализуется согласно структуре рис. 11, с учетом уравнения (10) для местной обратной связи. Нелинейная положительная ОС также реализуется согласно уравнению (10).

На рис. 14 приведены переходные характеристики замкнутой САУ с нелинейным регулятором, использующим нелинейную положительную ОС.

Рис. 14. Переходные характеристики замкнутой САУ: 1 – задающий сигнал; 2 – выход регулятора; 3 – выход САУ.

Выход САУ снимался с измерительного преобразователя напряжения с передаточной функцией $W_{\text{ипн}}(s) = \frac{6/400}{1+0.04 \cdot s}$. Постоянная времени обмотки управления системы ПАФК равна 0,11 с. Коэффициент регулятора $K_P = 10$. Задающий сигнал изменялся в последовательности 1,2 – 2,4 – 4,2 – 6,0 В, что соответствует установившемуся напряжению СГ 80 – 160 – 280 – 400 В.

Несмотря на значительное изменение параметров СГ нелинейный регулятор с положительной ОС обеспечивает практически одинаковые переходные процессы во всем диапазоне напряжения СГ.

Следует отметить, что коэффициент K_P остается постоянным и определяется с учетом только некомпенсируемых постоянных времени обмотки управления ПАФК и измерительного преобразователя напряжения.

Результаты

Исследование математической модели САУ показали следующее.

1. Введение положительной обратной связи в астатическую САУ позволяет увеличить ее порядок астатизма и, соответственно, исключить скоростную ошибку при отработке изменяющихся линейно задающих сигналов.
2. Введение положительной обратной связи в статическую САУ делает ее астатической, исключая статическую ошибку.
3. Введение положительной обратной связи в регулятор исключает эффект «интегрального насыщения».
4. Применение нелинейной модели компенсируемой части объекта управления позволяет синтезировать удовлетворительные показатели САУ нелинейным объектом управления.
5. Введение положительной обратной связи увеличивает чувствительность САУ к возмущающим воздействиям в области низких частот.

Выводы

Введение положительной обратной связи в САУ, увеличивая астатизм, повышает ее точность и исключает эффект «интегрального насыщения».

Введение положительной обратной связи увеличивает чувствительность САУ к возмущениям в области низких частот, что нужно учитывать при синтезе САУ.

Введение положительной обратной связи приводит к низкой чувствительности САУ к изменению ее параметров.

Результаты, полученные в данной работе, могут использоваться при построении различных систем автоматического управления, с аналоговыми и цифровыми регуляторами, без специальных защитных аппаратных средств.

В дальнейшем предполагается провести исследование эффекта «интегрального насыщения» и влияния положительных обратных связей в цифровых системах регулирования.

Вклад авторов в статью: В.К. Усольцев – определение структур, вывод уравнений объекта и регулятора, моделирование САУ широкодиапазонного регулирования напряжения; А.М. Ханнанов – моделирование объекта управления, расчет частотных и переходных характеристик, обзор зарубежной литературы, перевод на английский язык; К.В. Чупина – описание объекта управления и САУ, анализ источников, определение тенденций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: принципы построения и модификации Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (дата обращения: 10.11.2019).

2. Денисенко В.В. ПИД регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 4. С. 86–97. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf> (дата обращения: 19.12.2019).
3. Усольцев В.К., Влияние насыщения регулятора на переходный процесс в системе автоматического управления // Научный альманах. 2016. № 2–2(16). С. 411–419. URL: <http://uc-om.ru/doc/na.2016.02.02.411.pdf> (дата обращения: 19.01.2020).
4. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006, 460 p. URL: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf> – 19.03.2020.
5. Chupina K.V., Kataev E.V., Khannanov A.M., Korshunov V.N., Sennikov I.A. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters “cable – towed underwater vehicle”. Journal of Physics: Conf. Series. 2018;1015(3). DOI: 10.1088/17426596/1015/3/032167
6. Inés Tejado, Blas M. Vinagre, José Emilio Traver, Javier Prieto-Arranz, Cristina Nuevo-Gallardo. Back to Basics: Meaning of the Parameters of Fractional Order PID Controllers. Mathematics, 2019,7(6):530. DOI: <https://doi.org/10.3390/math7060530>
7. Purushottama Rao Dasari and A. Seshagiri Rao. Enhanced Dynamic Set-point Weighting Design for Two-Input-Two-Output (TITO) Unstable Processes. Chemical Product and Process Modeling. 2019;15(1). DOI: <https://doi.org/10.1515/cppm-2019-0014>
8. Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches. L., Springer, 2012, 595 p. URL: http://folk.ntnu.no/skoge/publications_others/books/vilanova-visioli-PID control in the Third Millennium – Springer 2012.pdf – 19.02.2020.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Ship Power Plants

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-7>

Khannanov A., Chupina K., Usoltcev V.

ANDREY KHANNANOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: hanr@mail.ru

KIRA CHUPINA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: chupina.kv@dvfu.ru

VALERY USOLTCEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: usvalerij@yandex.ru

Department of Ship Energy and Automation, School of Engineering
Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia

Increasing the astatism of the automatic control system by introducing positive feedback

Abstract: *Question status:* Subordinate automatic control systems (SACS) are widely used in engineering inclusive of ship power plants. The need to limit specific parameters of the object makes them non-linear.

The use of proportional-integral regulators leads to the problem of *integral saturation*, the emergence of free movements in SACS when the regulators descend from the limit. The authors propose to increase astatism of SACS and solve the problem of integral saturation by introducing additional positive feedback.

Materials and methods: Analysis of mathematical models of non-linear SACS and their digital modeling are used.

Results: A mathematical model of one of the ACS loops with additional positive feedback is described. It is confirmed that introduction of positive feedback can increase astatism of SACS and eliminate the effect of integral saturation with first-order astatism, which increases the accuracy of SACS when processing control signals. A new method is proposed to eliminate the effect of integral saturation in wide-range voltage regulators of onboard synchronous generators of field lighting systems without the use of hardware protective equipment.

Conclusions: the efficiency of introducing additional positive feedback to increase the accuracy of SACS and eliminate the effect of integral saturation is duly evidenced. Low sensitivity of the effect of positive feedback introduction to the change of SACS parameters is as well noted.

Keywords: automatic control system, subordinate regulation, saturation of the regulator, positive feedback, mathematical model, digital modeling, astatism.

REFERENCES

1. Denisenko V.V. PID regulators: principles of construction and modification. Modern Automation Technologies. 2006(4):66–74. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>. – 10.11.2019.
2. Denisenko V.V. PID controllers: implementation issues. CTA Magazine. 2007(4):86–97. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf> – 19.12.2019.
3. Usoltsev V.K. Effect of regulator saturation on the transient in the automatic control system. Nauchnyy al'manakh. 2016(2-2):411–419. URL: <http://ucom.ru/doc/na.2016.02.02.411.pdf> - 19.01.2020.
4. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006, 460 p. URL: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf> – 19.03.2020.
5. Chupina K.V., Kataev E.V., Khannanov A.M., Korshunov V.N., Sennikov I.A. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters “cable – towed underwater vehicle”. J. of Physics: Conf. Series. 2018;1015(3). DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032167
6. Inés Tejado, Blas M. Vinagre, José Emilio Traver, Javier Prieto-Arranz, Cristina Nuevo-Gallardo. Back to Basics: Meaning of the Parameters of Fractional Order PID Controllers. Mathematics 2019;7(6):530. DOI: <https://doi.org/10.3390/math7060530>
7. Purushottama Rao Dasari and A. Seshagiri Rao. Enhanced Dynamic Set-point Weighting Design for Two-Input-Two-Output (TITO) Unstable Processes. Chemical Product and Process Modeling. 2019;15(1). DOI: <https://doi.org/10.1515/cppm-2019-0014>
8. Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches. L., Springer, 2012, 595 p. URL: http://folk.ntnu.no/skoge/puublications_others/books/vilanova-visioli-PID_control_in_the_Third_Millennium_Springer_2012.pdf – 19.02.2020.