УДК 681.515

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С АДАПТИВНЫМ ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ

А. В. Босак, И. Я. Майданский, А. О. Петрученко
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Аннотация. *Разработана математическая модель компенсации возмущающих воздействий на объект управления, основанной на использовании специальной компенсирующей модели, функционирующей в соответствии с обратным динамическим алгоритмом по действительной скорости или положению с применением нечеткого регулятора. Смоделированы основные переходные характеристики процесса управления скоростью привода постоянного тока для электропривода грузоподъемных электромеханических установок с адаптивным фаззи-регулятором.*

Ключевые слова: *электромеханическая система, адаптивный фаззи-регулятор, обратный динамический алгоритм, компенсирующая модель.*

Введение

Современная теория регулирования основана на управлении состоянием с обратной связью, позволяющей изменять структуру системы, и делает ее мало чувствительной к изменению параметров и нагрузки. Управление с прямыми передачами часто применяется в прогнозирующем управлении (задача слежения), для компенсации инерционности объекта, а также при раздельном управлении в многодвигательных электроприводах. В последнее время учитывается изменение параметров в системе управления электроприводом ("робастность"). Характерным для робастного управления является наличие внутренней модели (компенсатора), стабилизатора для всей системы и регулятора с прямой передачей. Последний отличается тем преимуществом, что он обеспечивает быструю реакцию управляющей системы на изменение параметров.

В приводах циклического действия (особенно в манипуляторах со многими степенями свободы) динамика системы существенно нелинейная. Известны различные методы компенсации этих нелинейностей. Наиболее популярны методы, в которых для устранения нелинейных эффектов компенсирующие влияния вычисляются с помощью обратных динамических алгоритмов. При воздействии на систему нескольких возмущающих факторов с целью сокращения объема вычислений используют блоки наблюдения, которые определяют суммарное возмущение без оценки обратной динамики по каждому из возмущений. Оцененное значение возмущений подается на регулятор, позволяющий реализовать робастную систему привода.

© Босак А. В., Майданский И. Я., Петрученко А. О. 2017

1. Цель и задачи исследования

Для компенсации внешних и параметрических возмущений в сложных электромеханических системах создается компенсирующая модель, функционирующая в соответствии с обратным динамическим алгоритмом по действительной скорости или положению, обеспечивающая точную отработку заданной оптимальной диаграммы скорости.

2. Общая часть

К грузоподъемным установкам относятся шахтные подъемные установки, различные краны, представляющие собой сложный комплекс одновременно работающих механизмов, лифты, экскаваторы и др.

Одним из исходных положений при анализе работы электроприводов таких электромеханических систем (ЭМС) является оптимальная скоростная диаграмма и обобщенный параметр этой диаграммы – рывок [1, 2]. Рывок дает возможность правильно подойти к выбору оптимальной скоростной диаграммы разгона и замедления, обеспечить производительность установки и минимальные динамические нагрузки на его механизмы.

Оптимальный режим работы определяется оптимальным управлением, которое обеспечивает минимально возможные потери в электродвигателе при выполнении заданного перемещения за определенное время при соблюдении $V = V_m$ и $I \le I_m$, где V_m - предельная максимальная

скорость движения груза, I_m - максимальная сила тока.

К системам управления электроприводами перечисленных объектов предъявляется ряд жестких требований: высокое быстродействие, точность воспроизведения заданных траекторий и плавность движения, отсутствие перерегулирования в переходных режимах, необходимый запас устойчивости, надежность.

Необходимость управления неопределенными динамическими объектами привела к развитию концепции адаптивного управления. Одним из основных подходов, широко примененных в теории адаптивного управления, состоит в получении оценок меняющихся во времени характеристик объекта управления, определенным образом связанных с его параметрами, и последующем использовании полученной информации для изменения настройки регулятора с целью поддержания неизмененных свойств замкнутой системы управления.

Одним из наиболее эффективных способов реализации адаптивного управления электроприводом является применение простого фаззирегулятора (ФР) [3, 4], работающего по ошибке воспроизведения задающих диаграмм скорости, тока, положения и производной тока по времени. При этом особенно важное значение имеет надежная и стабильная реализация задающей модели, формирующей заданные сигналы, пропорциональные действительным желаемым диаграммам управляемых переменных. ФР автоматически меняет коэффициент усиления разомкнутой системы в зависимости от ошибки регулирования, используя прямую передачу по заданному ускорению с учетом производной тока по времени. Структурная схема задающей модели третьего порядка показана на рис. 1 [5].

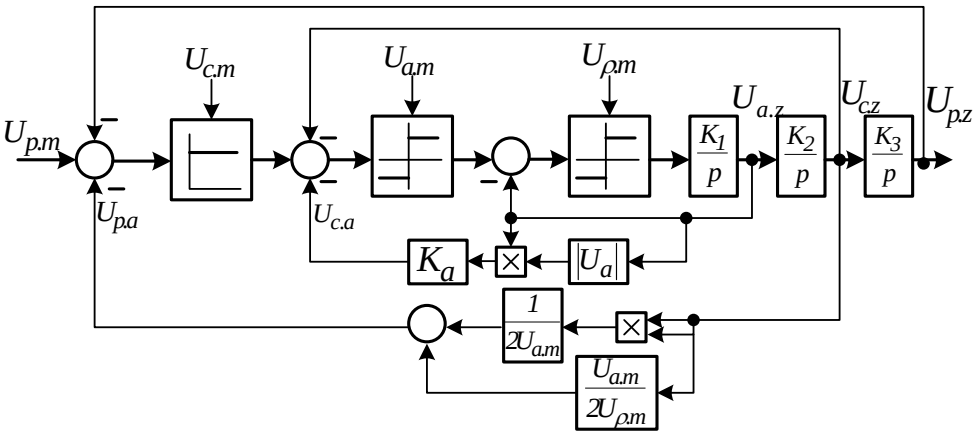


Рис. 1. Структурная схема задающей модели третьего порядка

Здесь сигналы $U_{p.m}, U_{c.m}, U_{a.m}$ и $U_{\rho.m}$ соответственно пропорциональны заданным максимальным значениям перемещения $S_{p.m}$, скорости $V_{c.m}$, ускорения a_m, рывка ρ_m. Обратные связи $U_{c.a}$ и $U_{p.a}$ определяют оптимальное значение точки начала уменьшения скорости (замедления) контуров скорости и положения, обеспечивающих точную реализацию заданных диаграмм.

Одним из исходных положений в построении ЗМ третьего порядка является использование ограничения производной ускорения (тока) – рывка.

Величины рывка и максимального (ограничиваемого) ускорения определяют темп изменения силы тока при движении ЭМС и позволяют добиться режима пуска и замедления без толчков, обеспечивая плавный переход от изменяющегося режима к установившемуся и обратно. В любом случае должна соблюдаться точная реализация наперед заданной диаграммы скорости, что зависит от системы управления электроприводом.

Скоростные диаграммы всегда конкретны, и их надо рассматривать только для данного электропривода, исходя из выражения $\frac{di}{dt} = d\rho$ при плавном его изменении, как в период разгона, так и в периоды замедления, вообще в переходных режимах.

Графики задающих сигналов скорости $U_{\tilde{n}.z}$ и ускорения $U_{a.z}$ показаны на рис. 2.

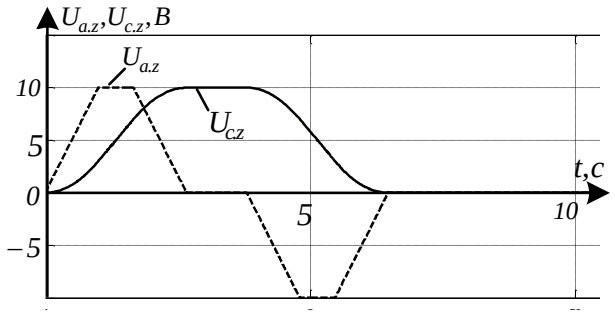


Рис. 2. Графики задающих сигналов $U_{a.z}$, $U_{ñ.z}$

Оптимальная структура и параметры связи $U_{p.a}$ определены из рассмотрения диаграммы скорости в период замедления (рис. 3).

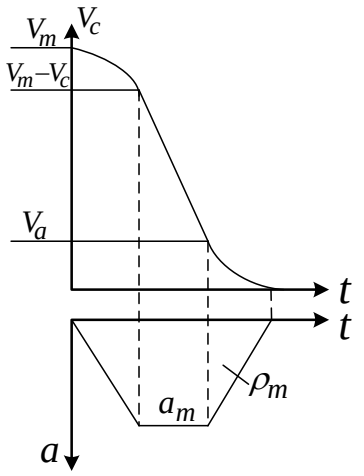


Рис. 3. Оптимальная диаграмма скорости и ускорения

Площадь диаграммы скорости рис.3 определяет путь с момента начала замедления до полной остановки. Эта величина определяется следующими зависимостями

$$U_{p.a} = \frac{V_m a_m}{\rho_m} - \frac{(V_m - V_a + V_a)(V_m - V_a - V_a)}{2a_m}, \quad (1)$$

где $V_a = \frac{a_m^2}{2\rho_m}$ - скорость, определяемая действием сигнала рывка.

С учетом значения V_a из (1) следует

$$U_{p.a} = \frac{V_m^2}{2a_m} + \frac{V_m a_m}{2\rho_m} \quad (2)$$

На схеме рис. 1 зависимость $U_{p.a}$ представлена в параметрах модели. Коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_a определены с учетом реальной формы действительных диаграмм. При выборе параметров модели, анализируемой в аналоговом варианте, все ограничения переменных приняты одинаковыми равными 10 В. Коэффициент K_a определяется по формуле $K_a = \frac{K_2}{2K_1 U_{\rho.m}}$. Выходными (задающими) сигналами задающей модели используются сигналы U_a, U_c и U_ρ.

В качестве объекта моделирования принята ЭМС с электродвигателем и упруго-вязкой механической передачей, представленная на рис. 4.

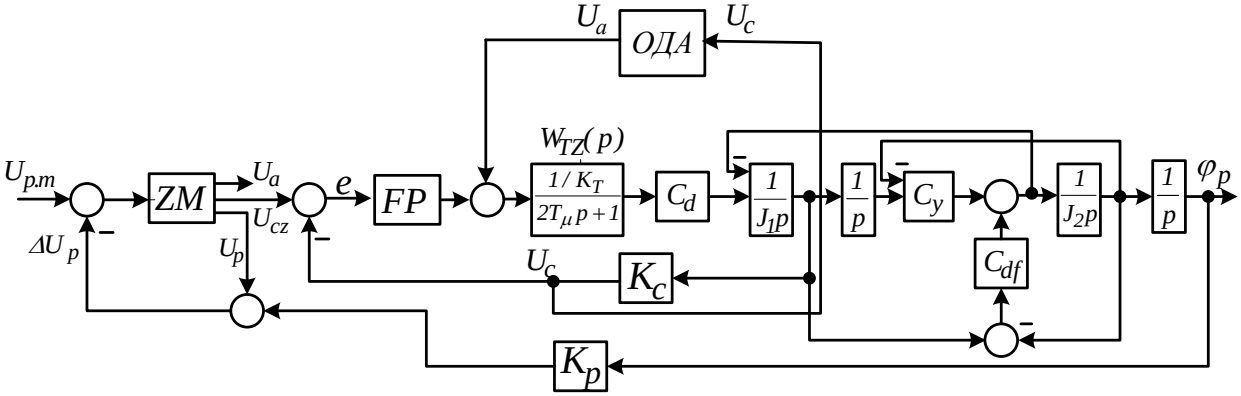


Рис. 4. Структурная схема ЭМС с электродвигателем и упруго-вязкой механической передачей

Структура ФР показана на рис. 5.

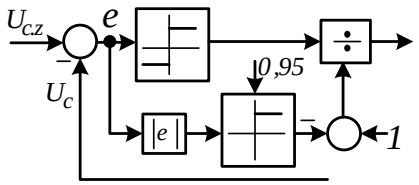


Рис. 5. Структурная схема адаптивного фаззи-регулятора

Входной сигнал $e = U_{c.z} - U_c$ с помощью нелинейной передачи и делительного блока увеличивает коэффициент усиления разомкнутой системы до достаточно большого значения. Вследствие этого ошибка e стремится к нулю и действительная скорость становится равной заданной. Для компенсации неидеальности объекта управления и влияния нагрузки, а также измене-

ния момента инерции используется прямая передача сигнала ускорения, подаваемого на вход регулятора тока, т.е. на звено с передаточной функцией замкнутого контура тока $W_{TZ}(p)$.

Для определения сигнала действительного ускорения системы по реальной скорости используется обратный динамический алгоритм (ОДА) по нелинейной зависимости (см. рис. 4)

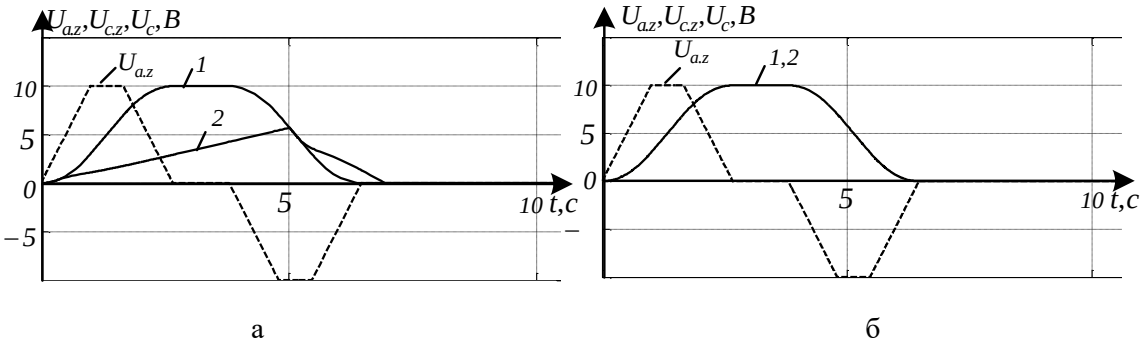
$$U_a = \begin{cases} \sqrt{U_c}, U_c \le U_{c.a}; \\ U_{a.m}, U_{c.a} \le U_c < U_{c.m} - U_{c.a}; \\ \sqrt{U_{c.m} - U_c}, U_{c.m} - U_{c.a} < U_c < U_{c.m}. \end{cases} \quad (3)$$

Изменение знака сигнала ускорения U_a осуществляется по знаку сигнала рывка. При такой схеме компенсации компенсирующий сигнал (КС) определятся по разности между ускорением, полученным в задающей модели и действительным, полученным в результате использования обратного динамического алгоритма, или сигнала КС принимаемого пропорциональным действительному ускорению системы. В рассмотренном варианте моделирования использован привод постоянного тока системы ТП-Д с двигателем 2ПФ315L: P_n=90 кВт; N_n=750 об/мин; I_n=435 А; J_n=5,5 кгм^2 и привод переменного тока с частотно-регулируемым асинхронным двигателем 4А315s8: P_n=90 кВт; N_n=750 об/мин; I_n=178 А; J_n=4,1 кгм^2.

Предлагаемая система управления обеспечивает воспроизведение управляющих сигналов с компенсацией изменяющихся момента инерции и статической нагрузки. Эта компенсация достигается применением адаптивного ФР и прямой передачи сигналов ускорения.

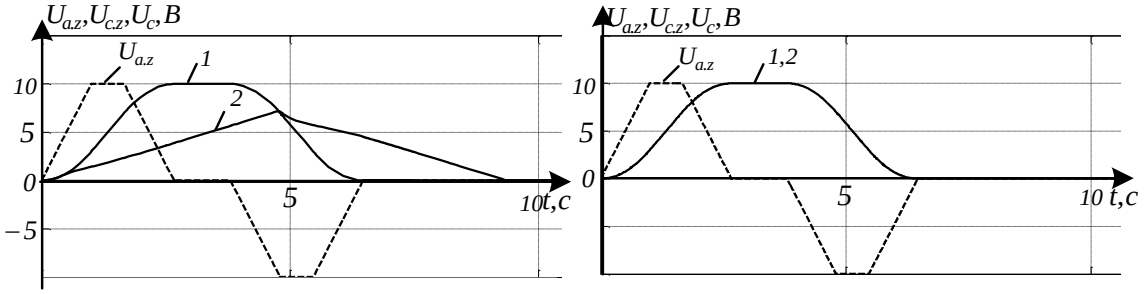
В системе с упругими звеньями реализуется также сглаживание упругих колебаний. Для этого дополнительно выбираются параметры рывка так, чтобы время линейного изменения ускорения было приблизительно равно половине периода собственных упругих колебаний. В исследуемой системе время действия рывка составляет 1с при периоде упругих колебаний примерно равным 2с.

На рис. 6, 7, 8 показаны графики заданной скорости и действительной при действии возмущающих воздействий, полученные в результате компьютерного моделирования. Для оценки влияния ФР на переходные процессы этот регулятор заменялся П - регулятором с постоянным коэффициентом передачи.



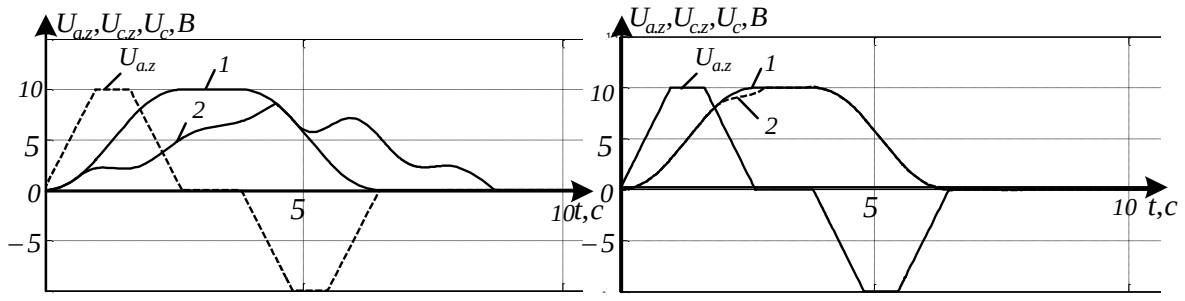
а б

Рис. 6 Диаграммы заданной – 1 и действительной – 2 скорости при изменении статической нагрузки: а – без ФР и КС, б – с ФР и КС



а б

Рис. 7. Диаграммы заданной – 1 и действительной – 2 скорости при изменении момента инерции: а – без ФР и КС, б – с ФР и КС



а б

Рис. 8. Диаграммы заданной – 1 и действительной – 2 скорости при колебательном управляемым объектом: а – без ФР и КС, б – с ФР и КС

Выводы

1. Использование адаптивного фаззи-регулятора скорости обеспечивает компенсацию изменений статической нагрузки и приведенного момента системы. 2. Рывок в контуре регулятора тока позволяет формировать любую диаграмму скорости. 3. При определенных параметрах сигнала рывка практически исключаются упругие колебания в механических передачах.

Список использованной литературы

1. Живов, Л. Г. Привод и автоматика самоходных кранов / Л. Г. Живов [Текст]. – М.: "Машиностроение", 1974. – 150 с.

2. Киричек, Ю. Г. Привод шахтных подъемных установок большой мощности / Ю. Г. Киричек, В. М. Чермалых [Текст]. – М.: Недра, 1976. – 336 с.

3. Hao Ying. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains / Hao Ying [Text]. // Automatica, 29. – 1993/ - P. 1579–1589.

4. Босак, А. В. Позиционное управление многосвязной электромеханической системой с адаптивным фаззи-регулятором / А. В. Босак, В. М. Чермалих [Текст] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 03(79). – С. 439–441.

References

1. Givov, L. G. (1974) "Drive and automation of self-propelled cranes", [Privod I avtomatika samohodnih kranov] Mechanical engineering, Moscow, Russia,150 p.

2. Kirichok, Y. G., Chermalykh, V. (1976) "Drive shaft hoisting large power plants" [Privod shahtnyh podjomnyh ustanovok bolshoy moshnosti] Nedra, Moscow, Russia, 336 p.

3. Hao Ying. (1993) "The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains", Automatica, 29. P. 1579–1589.

4. Bosak, A. V., Chermalykh, V. M. (2011) "Positional control of a multiply connected electromechanical system with an adaptive fuzzy controller" [Pozitsionnoe ypravlenie mnogosvayznoi elektromehanicheskoi sistemoi s adaptivnim fazi-regulaytorom], Electrical and computer systems, Ukraine, P. 439–441.

OPTIMIZATION OF THE DRIVE LIFTING ELECTROMECHANICAL INSTALLATION WITH ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER

A. Bosak, I. Maidanskyi, A. Petruchenko
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Abstract. *The mathematical model of compensation disturbances on the control object according to the reverse dynamic algorithm for the actual speed or position by using a fuzzy controller was developed. The main transient characteristics of process of the control DC drive speed and the transient characteristics of the operating process of the system that includes frequency converter and induction motor were obtained. A model of process of external compensation and parametric perturbations in driving positional electric complex structure were chosen. The basic steps and the relationship of the parameters simulation's process of compensation the disturbances were established. Scientific novelty is to develop a method of compensation the disturbances for improving of the transient characteristics of electromechanical system by exact operation with the given speed and accurate movement diagram and exact stop of working device in the necessary*

position. A theoretical basis of excluding the effect of changes in static load and the inertia moment by using compensating model that ensures stabilization of dynamic parameters of quality control during the parametric perturbations. The results of article allow to improve the transient processes of electromechanical systems for the electric drive of any structure under the conditions of disturbances.

Key words: *electromechanical system, reverse dynamic algorithm compensation, fuzzy control, fuzzy control, parametric perturbations.*

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВІД ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ УСТАНОВОК З АДАПТИВНИМ ФАЗІ-РЕГУЛЯТОРОМ

А. В. Босак, І. Я. Майданський, А. О. Петрученко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація. *Розроблено математичну модель компенсації збурювальних впливів на об'єкт керування, заснованої на використанні спеціальної компенсуючої моделі, що функціонує відповідно до зворотного динамічного алгоритму за дійсною швидкістю або положенням з застосуванням нечіткого регулятора. Змодельовані основні перехідні характеристики процесу керування швидкістю приводу постійного струму для електроприводу вантажопідйомних електромеханічних установок з адаптивним фазі-регулятором*

Ключові слова:*. електромеханічна система, нечіткий фазі - регулятор, зворотній динамічний алгоритм, компенсуюча модель.*

Получено 15.04.2017

Босак Алла Васильевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: alla_koz@ukr.net, тел. +38-050-729-50-67

Bosak Alla, PhD, Assistant of the department of electrical automation control complexes, *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, Peremogy Av., 37, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0545-9980

Майданский Иван Ярославович, старший преподаватель кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: alla_koz@ukr.net, тел. +38-097-341-18-41

Maidansky Ivan, Senior Lecturer of the department of electrical automation control complexes, *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, Peremogy Av., 37, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-0014-0834

Петрученко Андрей Олегович, аспирант кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: alla_koz@ukr.net, тел. +38-095-442-76-68

Petruchenko Andrey, graduate student of the department of electrical automation control complexes, *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, Peremogy Av., 37, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-1661-0455