

УДК 62-529

DOI 10.17513/snt.39625

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ РЕГУЛЯТОРОМ НЕЦЕЛОГО ПОРЯДКА

¹Авсиевич А.В., ¹Авсиевич В.В., ¹Буштрук Т.Н., ²Ульянов А.Д., ³Буштрук А.А.

¹ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», Самара, e-mail: a.avsievich@samgups.ru;

²ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Братск, e-mail: coberul@gmail.com;

³Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, e-mail: alexbushtruk@yandex.ru

Работа посвящена повышению качества работы электростанции, оснащенной системой автоматического управления СУДМ.03 для работы на газомоторном топливе, путем замены ПИД-регулятора на дробный ПИД-регулятор с целью улучшения качественных характеристик частоты вращения коленчатого вала, непосредственно влияющих на качество вырабатываемой электроэнергии. Проведены исследования на базе лабораторной установки электростанции с двигателем Д-242, переоборудованном под работу на газомоторном топливе. Построена имитационная модель лабораторной установки для определения оптимальных настроек исследуемых в работе ПИД-регуляторов с целыми и дробными показателями. Результаты лабораторных испытаний показали преимущество дробного ПИД-регулятора по качественным показателям переходного процесса – быстродействию и точности управления – по сравнению с применяемым классическим регулятором, что является результатом снижения взаимосвязи между забросом частоты и скоростью переходного процесса. Таким образом, применение алгоритма дробного ПИД-управления обеспечивает экономию топлива. В условиях одинаковой эксплуатации при использовании ПИД-регулятора расход топлива составил 0,0057 м³/ч, а при применении дробного ПИД-регулятора расход составил 0,0053 м³/ч. Экономия топлива составила при применении дробного ПИД-регулятора 7,02%, при этом наблюдалось улучшение качества работы двигателя. Данный метод управления возможно распространить на электростанции разной мощности с дополнительным исследованием настроечных параметров дробного ПИД-регулятора.

Ключевые слова: регулятор нецелого порядка, электростанция, автоматическая система управления, двигатель Д242, электронная система управления, частота вращения коленчатого вала, экономия топлива

THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE POWER PLANT BY A NON-INTEGRAL REGULATOR

¹Avsievich A.V., ¹Avsievich V.V., ¹Bushtruk T.N., ²Ulyanov A.D., ³Bushtruk A.A.

¹Samara State University Transport, Samara, e-mail: a.avsievich@samgups.ru;

²Bratsk State University, Bratsk, e-mail: coberul@gmail.com;

³Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, e-mail: alexbushtruk@yandex.ru

The work is devoted to improving the quality of operation of a power plant equipped with an automatic control system SUDM.03, for operation on gas-engine fuel, by replacing the PID controller with a fractional PID controller in order to improve the quality characteristics of the crankshaft speed, directly affecting the quality of electricity generated. The research was carried out on the basis of a laboratory installation of a power plant with a converted D242 engine for operation on gas-engine fuel. A simulation model of a laboratory installation is constructed to determine the optimal settings of the PID controllers studied in the work with integer and fractional indicators. The results of laboratory tests showed the advantage of the fractional PID controller in terms of the qualitative indicators of the transition process: the speed and accuracy of control compared to the classic controller used. Which is the result of a decrease in the relationship between the frequency drop and the speed of the transient process. Therefore, the use of the fractional PID control algorithm provides fuel economy. Under the same operating conditions, when using a PID controller, the fuel consumption was 0.0057 m³/h, and when using a fractional PID controller, the consumption was 0.0053 m³/h. Fuel economy was 7.02% when using a fractional PID controller, while there was an improvement in the quality of engine operation. This control method can be extended to power plants of different capacities with an additional study of the tuning parameters of the fractional PID controller.

Keywords: non-integer order regulator, power plant, automatic control system, D242 engine, electronic control system, crankshaft speed, fuel economy

Хотя в настоящее время перебои подачи централизованного электричества в городах и поселениях становятся редкостью, но необходимость в мини-электростанциях мощностью 10-20 кВт остается насущной и на сегодняшний день, в частности для постоянного и резервного электроснабжения медицинских и учебных учреждений, промышленных объектов и др. Большинство

мини-электростанций работают на дизельном топливе с использованием наиболее распространенных в нашей стране двигателей минского машиностроительного завода Д-242, Д-243 и Д-245.

Одним из путей снижения расходов при эксплуатации мини-электростанций является замена используемого топлива на аналог, имеющий более низкую ценовую

категорию. Таким топливом в нашей стране являются растительные масла [1; 2] и природный газ [3], использование которых, кроме экономии средств предприятий, позволит улучшить экологию окружающей среды путем сокращения вредных выбросов в атмосферу в процессе выработки электроэнергии. В настоящее время на рынке предлагается целый ряд систем автоматического управления (САУ), позволяющих перейти с дизельного топлива на газодизельное. Так, для линейки двигателей Д-242, Д-243, Д-245 компанией ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) разработана САУ СУДМ.03, которая может эксплуатироваться как в чисто дизельном режиме, так и в смешанном – газодизельном [4-6].

Вторым способом снижения расходов при эксплуатации мини-электростанций является модернизация системы автоматического управления частотой вращения двигателя (ЧВ). Параметры частоты вращения коленчатого вала двигателя энергетических установок регулируются ГОСТ 55231-2012, в котором регламентирован класс точности системы автоматического регулирования ЧВ коленчатого вала. Применение газомоторного топлива также повышает экологичность двигателя внутреннего сгорания в соответствии с экологическими нормами стандарта «Евро» ГОСТ 41.49-2003.

Для автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала до настоящего времени в основном применяются ПИД-регуляторы, основным конструктивным недостатком которых является жесткая взаимосвязь между временем переходного процесса и перерегулированием при смене нагрузочно-скоростного режима, что приводит к ухудшению точности регулирования при увеличении быстродействия САУ. Для решения данной проблемы предлагается применять дробный ПИД-регулятор

[7-9], основанный на рекуррентных алгоритмах дробного интегрирования и дифференцирования [10-12].

Целью данной работы является модернизация САУ СУДМ.03 путем замены алгоритма ПИД-регулятора на дробный ПИД-регулятор, проведенная на базе лабораторной энергетической установки с двигателем Д-242, и настройки его оптимальной работы с помощью известных методов [13-15]. Проведенные исследования показали, что применение дробного ПИД-регулятора позволяет решить проблему взаимозависимости времени переходного процесса и заброса частоты.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на базе межотраслевой лаборатории «Газомоторное и водородное топливо» Самарского государственного университета путей сообщения. Дизельный электрогенератор на базе двигателя Д-242 был оборудован системой автоматического управления СУДМ.03, которая даёт возможность использовать газомоторное топливо (рис. 1).

На базе газодизельной установки был проведен ряд испытаний с целью определения зависимости частоты вращения коленчатого вала (выход) от мгновенного расхода топлива (вход), при этом все остальные настройки двигателя и генератора во время испытаний полагались неизменными. Регистрация переходных процессов двигателя производилась на всем диапазоне от начальной частоты вращения 700 об./мин. до конечной частоты вращения 1000 об./мин. на уставках частоты вращения коленчатого вала, рекомендованных специалистами лаборатории «Газомоторное и водородное топливо», а именно 770, 794, 843, 868, 893, 917, 942, 966 об./мин. Для указанных значений уставок фиксировались частота вращения коленчатого вала и расход горючей смеси.



Рис. 1. Поддача газа в газодизельную установку на базе двигателя Д-242

Полученные результаты исследования экспериментальных данных не противоречат теории и практике работы двигателя внутреннего сгорания. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных по частоте вращения коленчатого вала позволяет сделать следующие выводы:

1) отклонение от заданной частоты оборотов двигателя составляет 0,08% на приведенных выше уставках двигателя;

2) с увеличением числа оборотов с 770 до 966 об./мин. величина дисперсии уменьшается на 88%, величина среднеквадратичного отклонения уменьшается на 67%.

Можно отметить, что расход топлива снижается с каждым повышением числа оборотов двигателя, причем средний расход топлива на высоких оборотах на 16% меньше расхода топлива при оборотах на холостом ходу. Колебание топливной рейки при изменении частоты оборотов от минимальных до максимальных снижается на 63%. Также в результате обработки данных выявлено, что отклонение частоты оборотов коленчатого вала двигателя и расхода топлива подчиняется нормальному закону распределения.

Математическая модель лабораторной установки в виде передаточной функции для разных частот по экспериментальным данным была построена в пакете System Identification ПО Matlab. Предварительно для уверенной идентификации было проведено сглаживание данных алгоритмом скользящего среднего, так как экспериментальные данные обладают большими шумами. Переходная функция электрогенератора для частоты 868 об./мин. имеет вид:

$$W_{868}(p) = \frac{-223,9p + 5,128}{p^2 + 95,96p + 0,1873}.$$

Она была найдена с использованием функции tfest пакета Matlab на заданной временной области и дает погрешность в 30,11% в сравнении с реальными данными. Согласно критерию Акаике ошибка составляет $FPE = 0,1453$, а средняя квадратичная оценка $MSE = 0,1452$, что является хорошим результатом при наличии шума в исходных данных. Переходная характеристика модели приведена на рисунке 2.

Для определения оптимальных настроек дробного ПИД-регулятора разработана модель газодизельной установки в пакете Simulink ПО Matlab (рис. 3) на основе передаточной функции (1). Уникальность модели газодизельной установки заключается в одновременном проведении моделирования двух процессов с ПИД-регулятором

и дробным ПИД-регулятором, что позволяет контролировать процесс подбора настроечных параметров обоих регуляторов за счёт вычисления в модели следующих качественных показателей переходного процесса: выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением ($\Delta\omega$, %), время управления (t_u), время переходного процесса (t_p), интегральная оценка качества (I_0), статическая ошибка ($\Delta\epsilon$), установившееся значение переходного процесса ($h(\infty)$). Величина η показывает, на сколько % интегральная оценка I_0 дробного ПИД-регулятора лучше по сравнению с обычным.

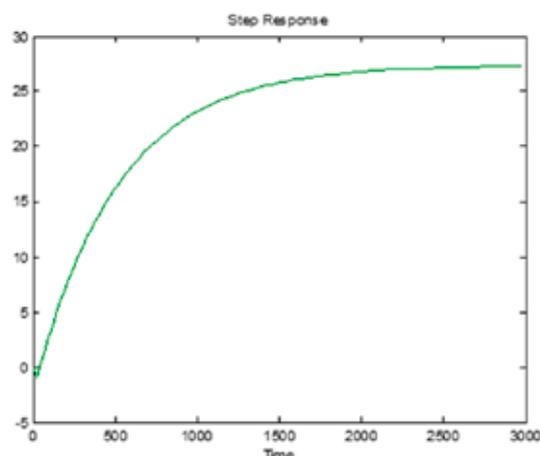


Рис. 2. Переходная характеристика модели двигателя электрогенератора

В ходе проведенных исследований на модели газодизельной установки получены переходные характеристики с оптимальными настройками дробного ПИД и ПИД-регуляторов, влияние показателей α и β дробного ПИД-регулятора на переходный процесс показано на рисунке 4. Значения качественных показателей, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице 1. Анализ данных таблицы 1 показал, что дробный ПИД-регулятор эффективней ПИД-регулятора по большинству показателей качества, в особенности по интегральной оценке I_0 . При использовании дробного ПИД-регулятора время переходного процесса уменьшается на 33%, значение интегральной оценки качества уменьшается в среднем на 11,5%, заброс частоты уменьшается на 144% по сравнению с моделью с ПИД-регулятором. Указанные преимущества дробного ПИД-регулятора достигаются путем управления связью между забросом частоты и быстрым действием с помощью параметров α и β .

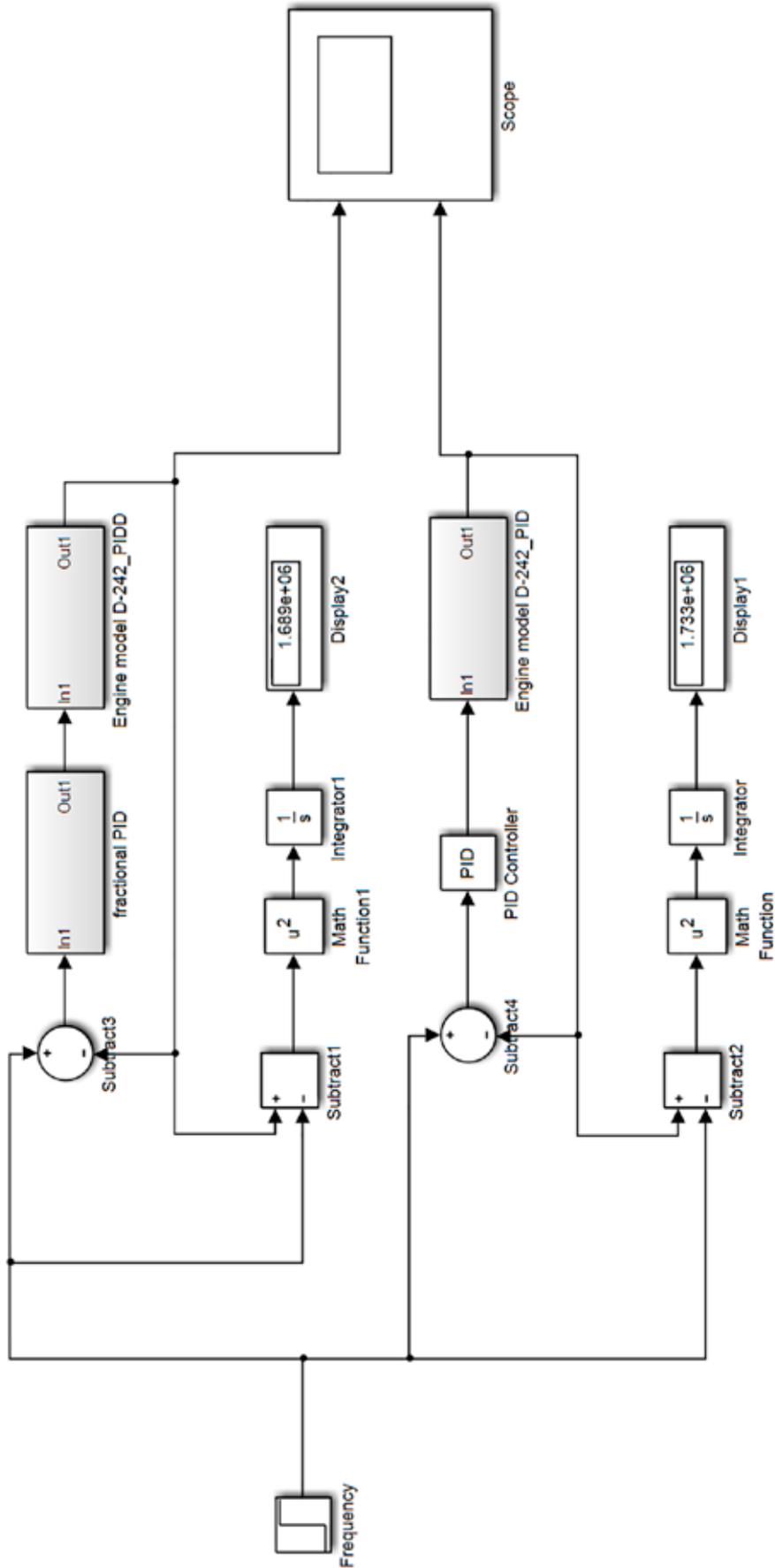


Рис. 3. Имитационная модель с дробным ПИД и ПИД-регуляторами

Таблица 1

Значения качественных показателей, полученные в результате эксперимента

параметры $\alpha=0,9999$ и $\beta=0,5$						
	$\Delta w, \%$	$h(\infty)$	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I_0	$\eta, \%$
ПИД	5,6	700	310,9	0	4,5277e+6	5,2
Дробн. ПИД	5,2	770	307	0	4,2975 e+6	
параметры $\alpha=0,5$ и $\beta=0,9999$						
	$\Delta w, \%$	$h(\infty)$	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I_0	$\eta, \%$
ПИД	5,6	770	310,9	0	4,5277e+6	5,6
Дробн. ПИД	1,4	770,7	169,3	0,7	4,2775e+6	

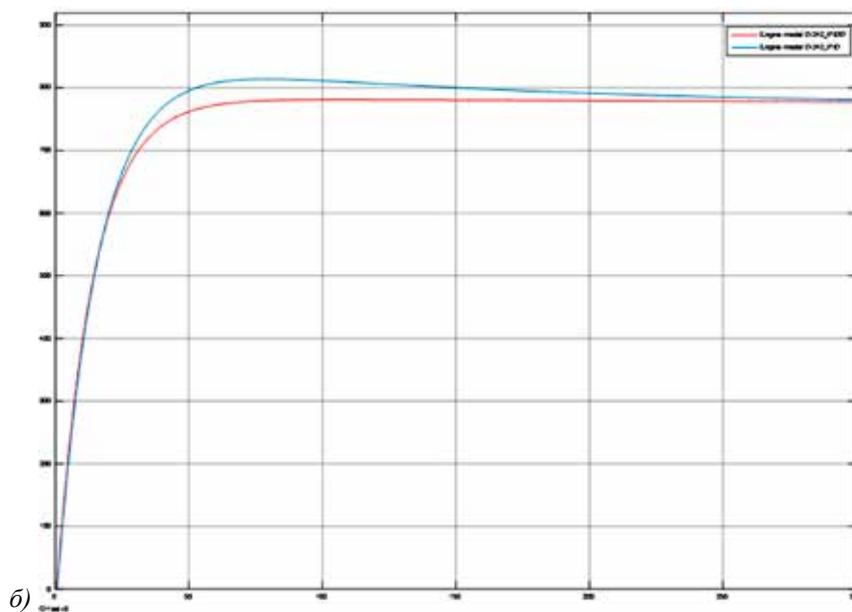
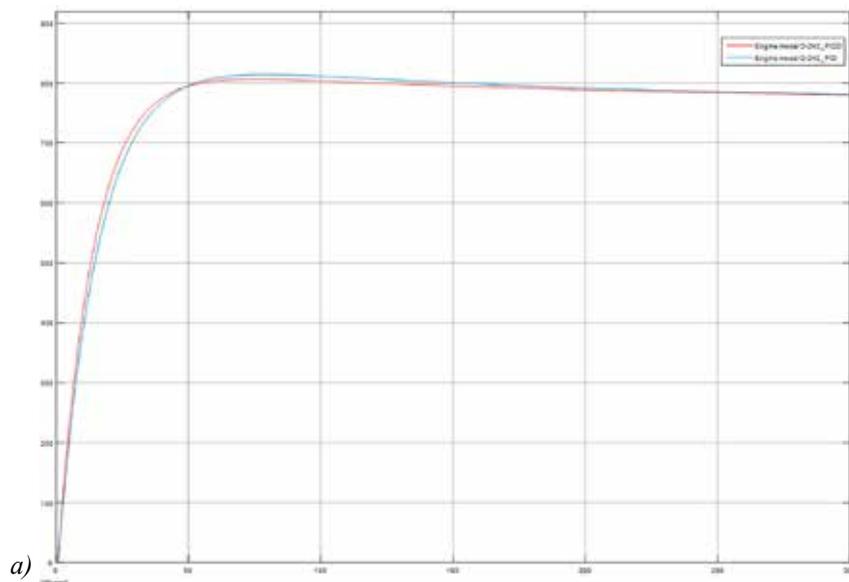


Рис. 4. Влияние параметров α и β в дробном ПИД-регуляторе:
 а) $\alpha = 0,9999, \beta=0,5$, б) $\alpha = 0,5, \beta=0,9999$

Таблица 2

Результаты исследования

	K_{Π}	$T_{\text{и}}$	$T_{\text{д}}$	α	β	$\Delta w, \%$	$t_{\text{р}}, \text{с}$	$Q, \text{м}^3/\text{ч}$
ПИД	2	0,01	0,005	–	–	8,3	2,46	0.0057
Дробн. ПИД	2	0,01	0,005	0,43	0,68	3,4	2,31	0.0053

Исследование, сопровождавшееся пятикратным повторением каждого эксперимента при одинаковых начальных условиях для обоих типов регуляторов, показало, что дробный ПИД-регулятор более экономичен по расходу топлива (табл. 2), экономия топлива при применении системы управления с дробным ПИД-регулятором составила 7,02% по сравнению с обычным ПИД-регулятором при остальных равных условиях.

Как следует из таблицы 2, экономия топлива достигается за счет уменьшения взаимосвязи между забросом частоты Δw и временем переходного процесса $t_{\text{р}}$. Изучение дробного ПИД-регулятора на лабораторной установке показывает, что его применение обеспечивает 1 класс точности регулирования по частоте вращения в соответствии с ГОСТ 55231-2012.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные исследования по применению дробного ПИД-регулятора, основанные на алгоритмах дробного ПИД-управления в цифровой системе автоматического управления электростанции на базе двигателя Д-242 в модельном виде, выявили, что в среднем заброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением уменьшился на 45,5%, снизились показатели времени переходного процесса и интегральной оценки качества на 33,3% и 6,8% соответственно.

В ходе эмпирических исследований выявлено, что расход топлива при использовании дробного ПИД-регулятора уменьшился в среднем на 7,02% относительно ПИД-регулятора в условиях повышения быстродействия и точности поддержания частоты вращения коленчатого вала.

Заключение

Исследование характеристик газодизельной модели САУ с дробным и обычным ПИД-регуляторами поддержания частоты вращения коленчатого вала газодизельной установки электростанции показало, что дробный ПИД-регулятор обладает большей эффективностью и может применяться для регулирования в энергетических установках.

Список литературы

1. Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Шахов А.В., Багров В.В. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях. М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), ООО «Онико-М», 2011. 536 с.
2. Хохлова Е.А., Хохлов А.А., Гузьяев А.А. Эффективность использования рыжикового масла в качестве компонента смесового дизельного топлива // Эксплуатация автотракторной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: сборник статей II Международной научно-практической конференции (Пенза, 22–23 октября 2015 г.). Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. С. 141–145.
3. Носырев Д.Я., Муратов А.В., Курманова Л.С., Петухов С.А. Оценка экономичности тягового автономного подвижного состава при использовании природного газа в качестве моторного топлива // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 2 (62). С. 34–38.
4. Марков В.А., Фурман В.В., Иванов В.А., Черезов И.А. Системы топливоподачи для газодизельных и газовых двигателей // Грузовик. 2013. № 4. С. 38–45.
5. Кулешов А.А., Марков В.А., Фурман В.В., Плахов С.В. Исследование влияния запальной дозы дизельного топлива на работу тепловозного газодизеля // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.). Гомель: БелГУТ, 2022. С. 260–261.
6. Фурман В.В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 34 с.
7. Жмудь В.А., Заворин А.Н. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 30–36
8. Авсиевич А.В., Авсиевич В.В. Алгоритмы дробного ПИД – управления в транспортных установках на газомоторном топливе // Наука и образование транспорту. 2019. № S1. С. 2-7.
9. Ivo Petras, Lubomir Dorcak, Imrich Kostial. Control quality enhancement by fractional order controllers // Acta Montanistica Slovaca. 1998. Rocnik 3. P. 143–148.
10. Avsievich A., Avsievich V., Ivaschenko A., Shcherbakov M. Fractional Regulating Implementation in Digital Control Systems // Cyber-Physical Systems and Control II. 2023. P. 293–303. DOI: 10.1007/978-3-031-20875-1_27.
11. Авсиевич А.В. Рекуррентные алгоритмы вычисления управляющего воздействия ПИД-регулятора вещественного порядка // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: материалы III Всероссийской научно-практической конференции (Самара, 26–27 января 2021 г.). Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2021. С. 7-12.
12. Авсиевич А.В., Авсиевич В.В. Алгоритмы дробного ПИД – управления в транспортных установках на газомоторном топливе // Наука и образование транспорту. 2019. № S1. С. 2-7.
13. Клюев А.С. Колесников А.А. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
14. Jun-Yi Cao., Bing-Gang Cao. Design of Fractional Order Controller Based on Particle Swarm Optimization // International Journal of Control, Automation and Systems. 2006. № 4. V. 6. P. 775–781.
15. Пантелеев А.В., Летова Т.А., Помазуева Е.А. Параметрический синтез оптимального в среднем дробного ПИД-регулятора в задаче управления полетом // Управление большими системами. 2015. № 56. С. 176–200.