

Научная статья
УДК 621.436

Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя

Владимир Анатольевич Марков¹, Филипп Борисович Барченко²,
Евгений Федорович Поздняков³, Олег Николаевич Слепцов⁴,
Ярослав Вадимович Смоликов⁵

^{1,2,3,4,5}Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹vladimir.markov58@yandex.ru

²barchenco@mail.ru

³pef07@mail.ru

⁴mabill@yandex.ru

⁵y.smolikov@gmail.com

Аннотация. Для повышения топливной экономичности и снижения выбросов токсичных компонентов с отработавшими газами дизельных двигателей необходимо обеспечить точное поддержание частоты вращения коленчатого вала. Эта функция возлагается на систему автоматического регулирования частоты вращения двигателя. В настоящее время преимущественное распространение в двигателестроении получили регуляторы частоты вращения, работающие по принципу Ползунова-Уатта. Однако эти регуляторы не всегда обеспечивают требуемые показатели статической точности регулирования частоты вращения и динамические показатели процесса регулирования. В статье исследована возможность улучшения названных показателей путём использования в регуляторе частоты вращения дизельного двигателя типа ЗМЗ 514 (4 ЧН 8,7/9,4) последовательно включённых корректирующих звеньев. В качестве такого звена рассмотрено корректирующее инерционно-форсирующее звено. С использованием программного комплекса SimInTech проведены расчёты переходных процессов наброса нагрузки на двигатель, оснащённый штатным регулятором частоты вращения и регулятором с последовательно включённым корректирующим звеном. Проведена оптимизация структуры и параметров рассматриваемого регулятора частоты вращения.

Ключевые слова: дизельный двигатель, система автоматического регулирования, продолжительность переходного процесса, перерегулирование, последовательно включённое корректирующее динамическое звено.

Для цитирования: Марков В.А., Барченко Ф.Б., Поздняков Е.Ф., Слепцов О.Н., Смоликов Я.В. Исследование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 2 (44).

Original article

Study of the Automatic Speed Control System of a Diesel Engine

Vladimir A. Markov¹, Philip B. Barchenko², Evgeniy F. Pozdnyakov³, Oleg N. Sleptsov⁴, Yaroslav V. Smolikov⁵

^{1,2,3,4,5}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹vladimir.markov58@yandex.ru

²barchenco@mail.ru

³pef07@mail.ru

⁴mabill@yandex.ru

⁵y.smolikov@gmail.com

Abstract. To increase fuel efficiency and reduce emissions of toxic components from exhaust gases of diesel engines, it is necessary to ensure accurate maintenance of the crankshaft speed. This function is assigned to the automatic engine speed control system. Currently, speed regulators operating on the Polzunov-Watt principle have become predominant in the engine industry. However, these regulators do not always provide the required indicators of static accuracy of speed control and dynamic parameters of the control process. The article examines the possibility of improving these indicators by using sequentially connected corrective links in the speed controller of a ZMZ 514 diesel engine (4 ChN 8,7/9,4). A corrective inertial-forcing link is considered as such a link. Using the SimInTech software package, calculations of transient processes of loading on an engine equipped with a standard speed controller and a regulator with a sequentially activated correction link were carried out. The optimization of the structure and parameters of the considered speed controller has been carried out.

Key words: diesel engine, automatic control system, duration of the transition process, overshoot, sequentially activated dynamic correction link.

For citation: Markov V.A., Barchenko P.B., Pozdnyakov E.F., Sleptsov O.N., Smolikov Ya.V. Study of the Automatic Speed Control System of a Diesel Engine. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 2 (44).

Введение

Современный этап развития двигателестроения характеризуется острой необходимостью повышения мощностных и динамических показателей дизельных двигателей, улучшения их экологических показателей, снижения эксплуатационного расхода топлива [1, 2]. Непременным условием достижения указанных показателей является более точное поддержание

заданного скоростного режима работы двигателя, улучшение статической точности регулирования частоты вращения, обеспечение требуемых динамических качеств двигателей [3, 4, 5]. Перечисленные функции обычно возлагаются на системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения двигателя. В настоящее время в двигателестроении широко применяют регуляторы, работающие по принципу Ползунова-Уатта (называемые также пропорциональными регуляторами или П-регуляторами). Однако эти регуляторы не всегда обеспечивают требуемые показатели статической точности регулирования частоты вращения и динамические показатели процесса регулирования.

Проведены работы по совершенствованию структуры и параметров систем автоматического регулирования частоты вращения дизельных двигателей с такими регуляторами [6-11]. Одним из эффективных методов улучшения качества процесса регулирования частоты вращения в двигателях с такими регуляторами является включение в структуру САР различных корректирующих звеньев [12]. В качестве таких звеньев используются дифференцирующие, интегрирующие, форсирующие и другие звенья. При этом недостаточно исследованным является вопрос о влиянии последовательно включённых в структуру САР корректирующих звеньев на её статические и динамические показатели. Целью исследования является определение оптимальных структуры и параметров САР дизельного двигателя на показатели качества процесса регулирования частоты вращения при последовательном включении в структуру САР корректирующего инерционно-форсирующего звена.

Расчётное исследование переходных процессов САР частоты вращения дизельного двигателя с пропорциональным регулятором без корректирующих звеньев

Объектом исследования являлся дизельный двигатель типа ЗМЗ 514 (4 ЧН 8,7/9,4), разработанный на Заволжском моторном заводе на базе

бензинового двигателя типа ЗМЗ-406. Он предназначен для установки на легковые и грузопассажирские автомобили Ульяновского автомобильного завода (УАЗ). Это рядный четырёхцилиндровый четырёхтактный двигатель с наддувом мощностью $N_e = 84$ кВт при частоте вращения коленчатого вала $n = 4000$ мин⁻¹. Кроме указанных автомобилей он используется также в стационарных энергоустановках – дизель-генераторных установках (ДГУ). В этом случае он работает при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹ и имеет мощность $N_e = 10$ кВт.

Для описания САР частоты вращения этого двигателя, работающего в составе ДГУ вырабатывающей переменный электрический ток, использована математическая модель САР. Она включает в себя линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, описывающие основные элементы САР – поршковую часть двигателя, его турбокомпрессор, впускной и выпускной трубопроводы (коллекторы) [11, 12, 13]. Для решения задач исследования использован программный комплекс (ПК) SimInTech [14, 15]. Сгенерированная в этом ПК схема моделирования САР двигателя со штатным пропорциональным регулятором (П-регулятором), работающим по принципу Ползунова-Уатта (без корректирующих звеньев) представлена на рис. 1. Эта схема представляет собой набор блоков (типовых динамических звеньев), описывающих наиболее значимые элементы комбинированного двигателя с указанием передаточных функций каждого блока САР [11, 12, 13].

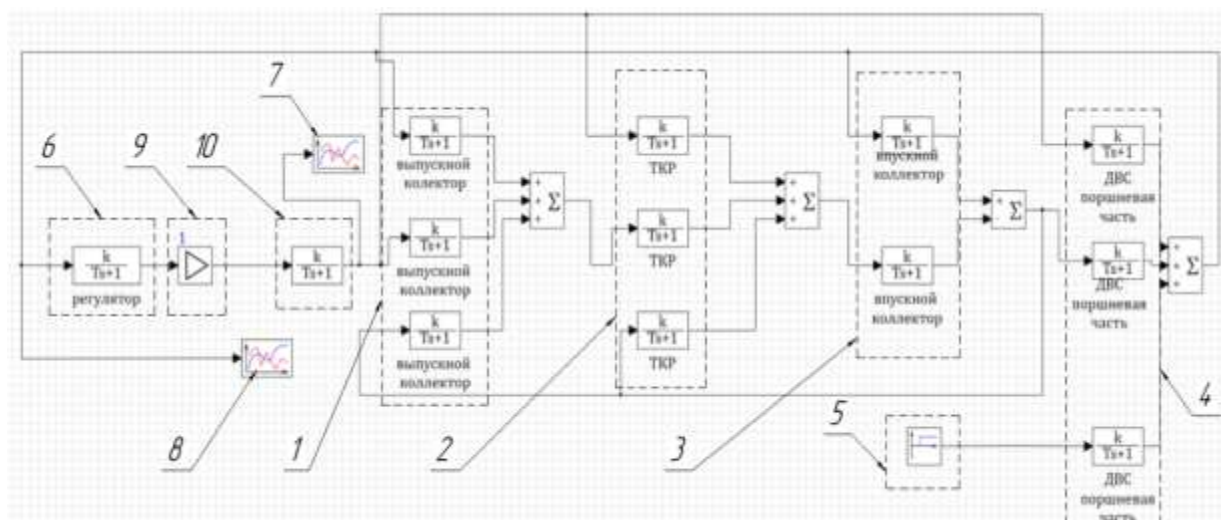


Рис. 1. Схема моделирования САУ с П-регулятором без корректирующего звена:
 1 и 3 – выпускной и впускной коллекторы; 2 – турбокомпрессор; 4 – поршневая часть;
 5 – модель внешнего воздействия; 6 – датчик частоты вращения;
 7 – вывод параметров регулятора; 8 – график переходного процесса;
 9 – П-регулятор; 10 – исполнительный механизм

Определение значений констант указанных передаточных функций – их постоянных времени T и коэффициентов усиления k проведено на основании данных работ [11, 12, 13]. Эти константы оказались равными: $k_{д1} = 0,120$; $k_{д2} = 0,0576$; $k_{д3} = -0,086$; $k_{т1} = 0,2532$; $k_{т2} = 0,0184$; $k_{т3} = -0,04983$; $k_{в1} = 1,950$; $k_{в2} = 0,0374$; $k_{г1} = 0,0696$; $k_{г2} = 1,500$; $k_{г3} = -0,140$; $T_d = 0,411$ с, $T_k = 0,098$ с, $T_v = 0,0038$ с; $T_r = 0,00457$ с (индексы «д», «т», «в» «г» указывают на принадлежность этих констант передаточным функциям, соответственно двигателя, турбокомпрессора, впускного и выпускного коллекторов.

На первом этапе исследования проведены расчёты переходных процессов наброса полной нагрузки на двигатель со штатным регулятором без корректирующих звеньев. Этот пропорциональный регулятор, работающий по принципу Ползунова-Уатта, описывается идеальным позиционным звеном (идеальным усилительным звеном) с передаточной функцией:

$$W(p) = k_{\Pi}$$

При расчетных исследованиях варьировались значения коэффициента усиления k_n пропорционального регулятора. Результаты этих расчётов приведены на рис. 2 и 3.

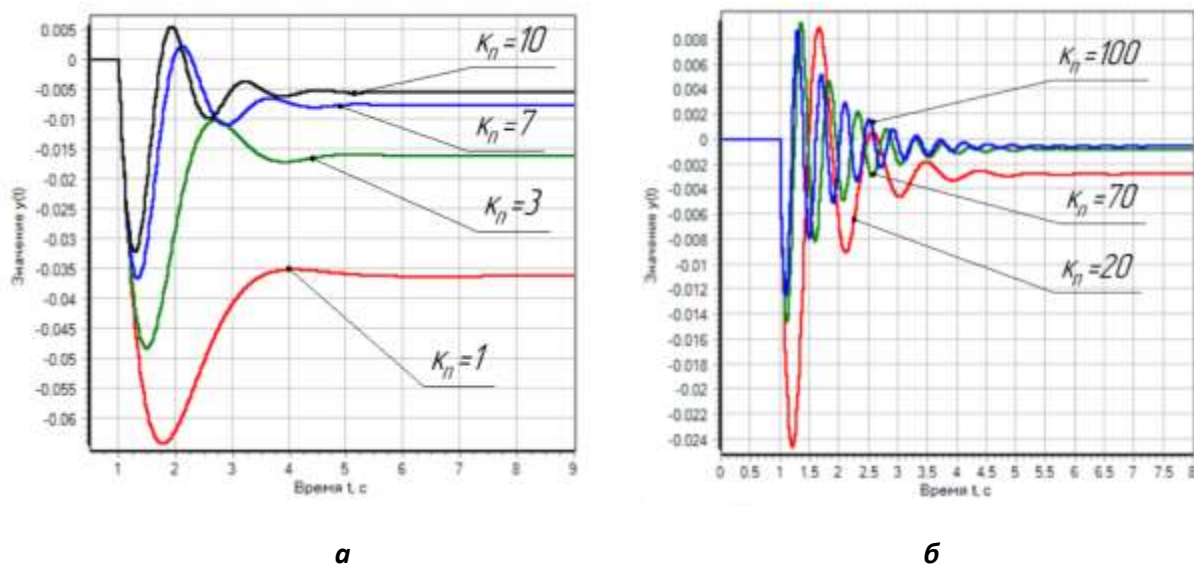


Рис. 2. Графики переходных процессов САР частоты вращения двигателя типа 4 ЧН 8,7/9,4 с П-регулятором при различных значениях коэффициента усиления регулятора k_n : а – $k_n = 1, 3, 7$ и 10 ; б – $k_n = 20, 70$ и 100

При анализе данных рис. 2 учитывалось, что рассматриваемый регулятор должен удовлетворять второму классу точности САР по ГОСТ Р 55231-2012 [11]. При этом предельные значения динамических показателей качества процесса регулирования следующие: продолжительность переходного процесса $t_n = 3$ с, перерегулирование $\sigma_n = 7,5\%$, наклон регуляторной характеристики (её статизм) $\delta_n = 2\%$ (табл. 1). При рассмотрении полученных расчетных переходных процессов, показанных на рис. 2, а определены показатели качества процесса регулирования, соответствующие различным значениям коэффициента усиления П-регулятора (табл. 2).

Таблица 1

Предельные показатели качества процесса регулирования при набросе нагрузки (ГОСТ Р 55231-2012)

Показатель	Класс точности САР			
	1	2	3	4
Диапазон изменения наклона регуляторной характеристики (ее статизма) δ_n , %	2-4*	2-4*	2-4**	2-4**
Нестабильность частоты вращения β_n , % ***	0,6/0,8	0,8/1,0	1,0/1,5	2,0/3,0
Продолжительность переходного процесса t_n , с	2,0	3,0	5,0	10,0
Перерегулирование σ_n , %	5,0	7,5	10,0	15,0

Примечание: * – по согласованию между изготовителем и потребителем (заказчиком) пределы изменения δ_n могут быть расширены до $\delta_n = 0-6\%$; ** – по согласованию между изготовителем и потребителем пределы изменения δ_n могут быть расширены до $\delta_n = 0-12\%$; *** – числитель – при относительной нагрузке от 25 до 100%, знаменатель – при относительной нагрузке до 25%.

Таблица 2

Показатели качества процесса регулирования частоты вращения двигателя при набросе нагрузки при различных значениях коэффициента усиления П-регулятора (см. рис. 2, а)

Показатель	Коэффициент усиления П-регулятора			
	$k_n = 1$	$k_n = 3$	$k_n = 7$	$k_n = 10$
Продолжительность переходного процесса t_n , с	3,1	2,9	2,4	2,3
Перерегулирование σ_n , %	6,9	4,8	3,6	3,2
Статическая ошибка регулирования $\Delta_{ст}$, %	3,7	1,6	0,8	0,5

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует о том, что при увеличении коэффициента усиления П-регулятора k_n с 1 до 10 все показатели качества процесса регулирования улучшаются. Так, при допустимой неустойчивости частоты вращения коленчатого вала $\beta_n = 0,8\%$ (для второго класса точности САР в соответствии с ГОСТ Р 55231-2012) увеличении коэффициента усиления k_n в указанном диапазоне сопровождается уменьшением продолжительности рассматриваемого переходного процесса t_n с 3,1 до 2,3 с, перерегулирования σ_n – с 6,9 до 3,2%, статической ошибки регулирования δ_n

– с 3,7 до 0,5%. Однако при дальнейшем увеличении коэффициента k_n становится выраженной колебательность САР (рис. 2, б), и, несмотря на уменьшение значений σ_n и $\Delta n_{ст}$, продолжительность переходного процесса t_n начинает увеличиваться. Улучшения названных показателей качества процесса регулирования можно достичь путём использования последовательно включённых корректирующих звеньев [12]. В качестве такого звена рассмотрено корректирующее инерционно-форсирующее звено.

Расчётное исследование переходных процессов САР частоты вращения дизельного двигателя с пропорциональным регулятором с корректирующим инерционно-форсирующим звеном

В соответствии с рекомендациями работы [12] с целью устранения колебательности переходного процесса исследовано последовательное включение в структуру САР корректирующего инерционно-форсирующего звена (его другие названия – интегродифференцирующее или режекторное звено) с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$$

Это звено может быть рассмотрено как параллельное соединение позиционного и дифференцирующего звеньев первого порядка. Наличие в структуре САР такого корректирующего звена позволяет существенно повысить коэффициент усиления k_n пропорционального регулятора, уменьшить статическую ошибку регулирования и перерегулирование без увеличения колебательности и продолжительности переходного процесса. Но при этом необходимо оптимизировать значения не только коэффициента k_n , пропорционального регулятора, но и значения постоянных времени T_1 и T_2 рассматриваемого корректирующего звена. Для решения этой задачи при помощи ПК SimInTech использован встроенный в этот ПК модуль «оптимизатор», что значительно упрощает решение поставленной задачи

оптимизации. Схема моделирования САР с корректирующим звеном представлена на рис. 3.

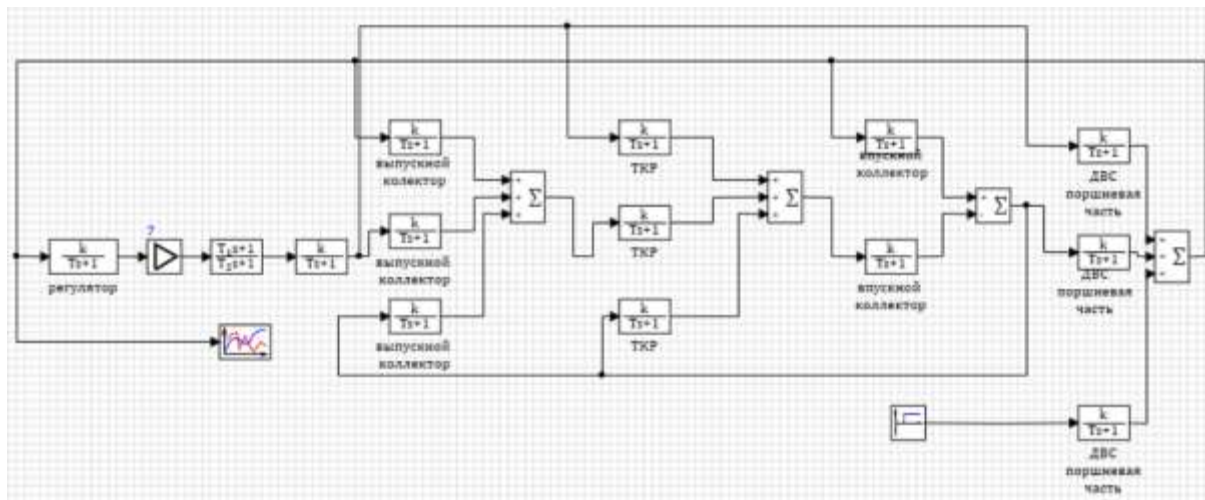


Рис. 3. Схема моделирования САР с П-регулятором и последовательно включённым инерционно-форсирующим корректирующим звеном

При указанном моделировании сначала создаётся субмодель, в которой и будут определяться значения продолжительности переходного процесса, перерегулирования и статической ошибки регулирования для каждого сочетания значений констант k_p , T_1 и T_2 , входящих в передаточные функции пропорционального регулятора и корректирующего звена. Принцип работы субмодели следующий (рис. 4). На средний входной порт блока «Ключ-3» (величина допуска), который принимает значения с допуском от выбранного 25%, подаётся модуль сигнала рассогласования. Если входной сигнал больше заданного значения на 25%, то на выход блока «Ключ-3» передаётся сигнал нижнего входного порта, на котором установлено текущее модельное время. Если управляющий сигнал (на среднем входном порту) меньше уставки, то на выход блока «Ключ-3» передаётся сигнал с верхнего входного порта, т.е. тот же сигнал, но задержанный на один шаг интегрирования. Задержку на один шаг интегрирования осуществляет блок, обозначенный как «Время переходного процесса» (блок «Задержка на шаг интегрирования» из вкладки «Нелинейные»). Для определения статической ошибки регулирования

создается отдельный выход с этим параметром (его значения берутся по модулю, чтобы учесть как положительную, так и отрицательную ошибку регулирования).

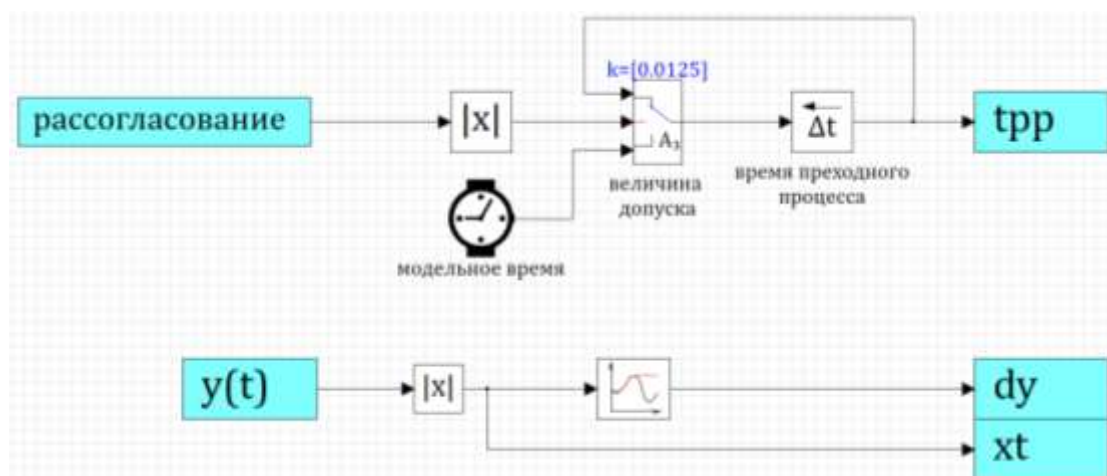


Рис. 4. Схема субмодели для определения оптимизируемых параметров

К выходам субмодели подключаются соответствующие блоки «запись в список сигналов», значения которых далее будут передаваться на блок оптимизатора (рис. 5). Затем создаётся блок оптимизатора, который и рассчитает необходимые значения параметров звеньев (рис. 6). При моделировании в разделе «Сервисы» выбирается пункт «Сигналы» и в открывшемся окне записываются сигналы и их атрибуты: оптимизируемые параметры (начальные значения можно задать нулевые).

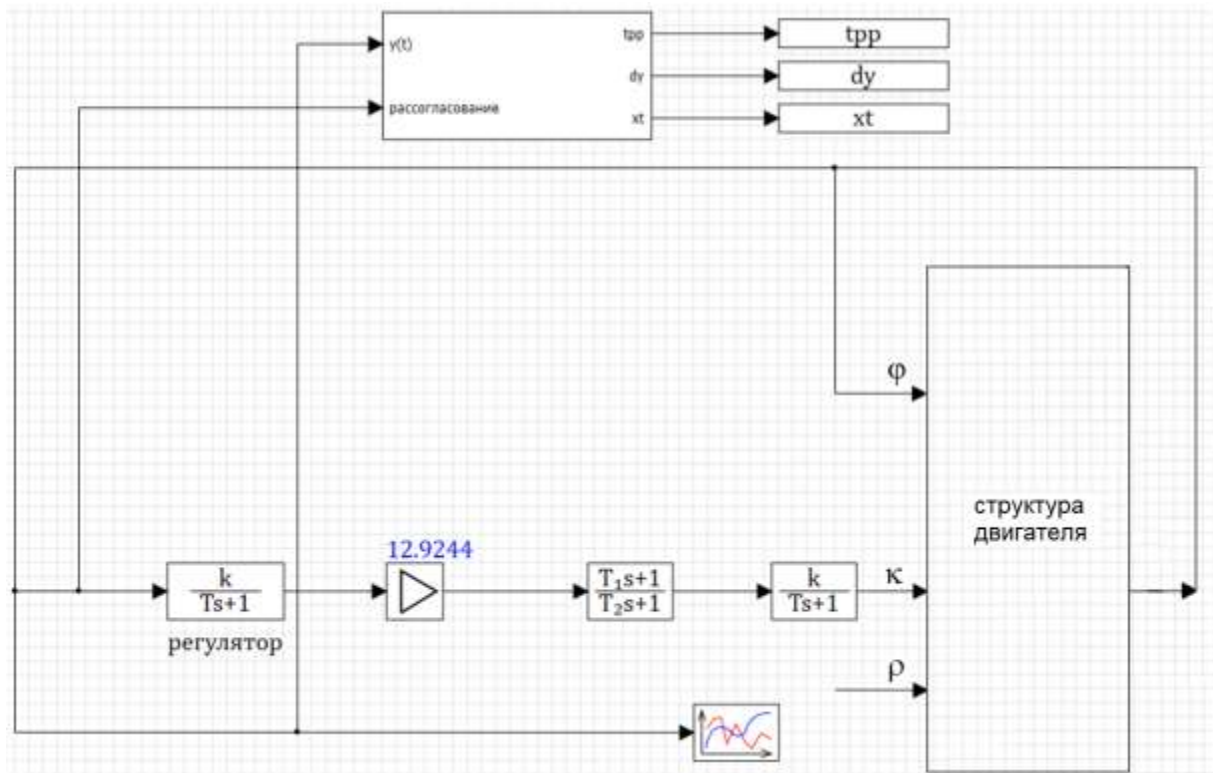


Рис. 5. Схема моделирования САР с присоединённой субмоделью для определения оптимизируемых параметров (нижний вход – сигнал рассогласования, верхний – сигнал перерегулирования и статической ошибки регулирования: ϕ – относительное отклонение частоты вращения вала двигателя; κ – относительное отклонение положения дозирующей рейки топливного насоса высокого давления; ρ – относительное отклонение давления наддувочного воздуха); структура двигателя включает в себя основные элементы комбинированного двигателя (поршневая часть, турбокомпрессор, впускной и выпускной коллекторы) и блок 5 (рис. 1), формирующий сигнал относительного отклонения нагрузки на двигатель α_0

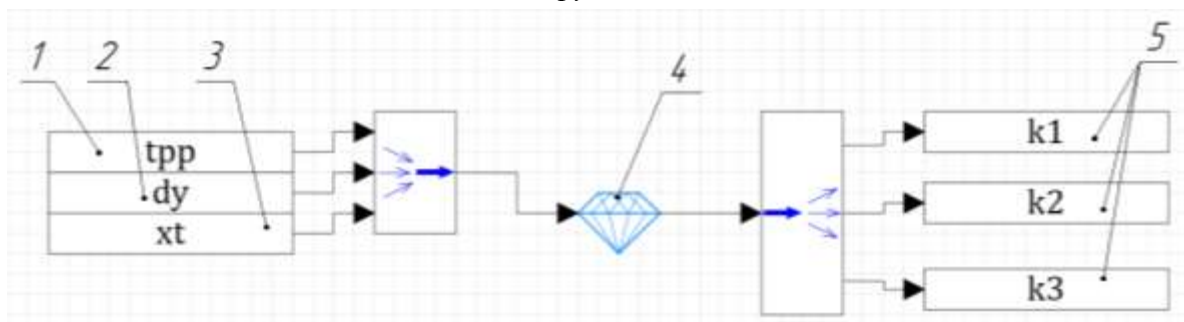


Рис. 6. Схема моделирования оптимизатора: 1-3 – величины продолжительности переходного процесса, перерегулирования и статической ошибки регулирования, 4 – блок оптимизатора, 5 – вычисляемые параметры звеньев САР частоты вращения

При настройке самого блока решателя в качестве режима оптимизации выбирается режим полного переходного процесса. При этом программа

осуществляет полный перебор возможных значений параметров переходного процесса (показателей его качества) в указанном диапазоне и выбирает их наиболее предпочтительное сочетание. В качестве метода оптимизации использован симплекс-метод. Минимальные и максимальные значения выходов блоков задают диапазон выбора из них оптимальных параметров. Начальное приближение выходов блоков – это вектор начальных значений оптимизируемых параметров. Затем задаётся желаемый диапазон изменения значений исследования параметров, характеризующих качество процесса регулирования – продолжительности переходного процесса, перерегулирования, статической ошибки регулирования. Полученный таким образом переходный процесс, показан на рис. 7, б. Он соответствует следующим значениям констант передаточных функций элементов САР: коэффициент усиления П-регулятора $k_n = 38,2$, постоянные времени корректирующего звена $T_1 = 0,15$ с и $T_2 = 0,01$ с.

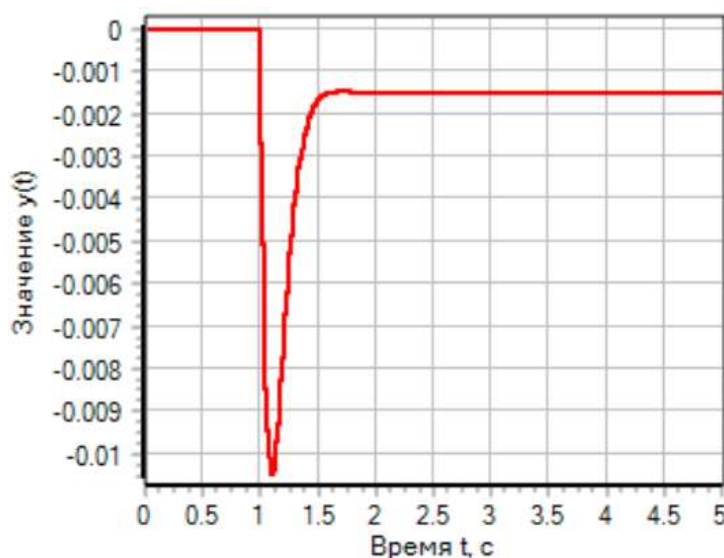


Рис. 7. График переходного процесса сброса нагрузки, полученный при расчёте

При анализе полученного графика переходного процесса сброса полной нагрузки на двигатель с П-регулятором и последовательно включенным корректирующим инерционно-форсирующим звеном получены

следующие показатели качества процесса регулирования:

продолжительность переходного процесса $t_n = 0,3$ с, перерегулирование $\sigma_n = 1,8\%$, статическая ошибка регулирования $\Delta n_{ст} = 0,15\%$. При этом в САР отсутствует колебательность. Таким образом, замена в исследованном двигателе П-регулятора с коэффициентом усиления П-регулятора $k_n = 10$ на последовательно включенные П-регулятор с $k_n = 38,2$ и корректирующее инерционно-форсирующее звено с постоянными времени $T_1 = 0,15$ с и $T_2 = 0,01$ с позволила снизить продолжительность переходного процесса t_n с 2,3 до 0,3 с (в 7,7 раза), перерегулирование σ_n – с 3,2 до 1,8% (в 1,8 раза), статическую ошибку регулирования $\Delta n_{ст}$ – с 0,5 до 0,15% (в 3,3 раза).

Полученные результаты расчетных исследований хорошо согласуются с данными работы [12] по двигателю типа Д6Н (6 ЧН 15/18) дизель-генераторной установки с пропорциональным регулятором и с П-регулятором с последовательно включенными корректирующими звеньями.

Выводы

1. В настоящее время в двигателестроении широко применяют регуляторы, работающие по принципу Ползунова-Уатта (пропорциональные регуляторы или П-регуляторы). Однако эти регуляторы не всегда обеспечивают требуемые показатели статической точности регулирования частоты вращения и динамические показатели процесса регулирования. Эффективным методом улучшения показателей качества процесса регулирования частоты вращения в двигателях с такими регуляторами является включение в структуру САР различных корректирующих звеньев. В качестве таких звеньев используются дифференцирующие, интегрирующие, форсирующие и другие звенья.

2. В качестве такого корректирующего звена рассмотрено **инерционно-форсирующее динамическое звено**. Это звено может быть рассмотрено как параллельное соединение позиционного и дифференцирующего звеньев

первого порядка. Наличие в структуре САР такого корректирующего звена позволяет существенно повысить коэффициент усиления k_{Π} регулятора, уменьшить перерегулирование и статическую ошибку регулирования без увеличения колебательности САР и продолжительности переходного процесса.

3. В качестве объекта исследования выбран дизельный двигатель типа ЗМЗ 514 (4 ЧН 8,7/9,4) Заволжского моторного завода. Рассмотрено его использование в стационарной энергоустановке – в дизель-генераторной установке, где он работает при частоте вращения $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и имеет мощность $N_e = 10 \text{ кВт}$.

4. Проведено расчётное исследование переходных процессов САР частоты вращения дизельного двигателя с пропорциональным регулятором без корректирующих звеньев и в этой САР с корректирующим инерционно-форсирующим звеном. Для моделирования переходных процессов и оптимизации параметров САР использованы линейная математическая модель, содержащая линейные дифференциальные уравнения элементов САР, и программный комплекс (ПК) SimInTech.

5. Замена в исследованном двигателе П-регулятора с коэффициентом усиления П-регулятора $k_{\Pi} = 10$ на последовательно включенные П-регулятор с $k_{\Pi} = 38,2$ и корректирующее инерционно-форсирующее звено с постоянными времени $T_1 = 0,15 \text{ с}$ и $T_2 = 0,01 \text{ с}$ позволила снизить продолжительность переходного процесса t_{Π} с 2,3 до 0,3 с (в 7,7 раза), перерегулирование σ_{Π} – с 3,2 до 1,8% (в 1,8 раза), статическую ошибку регулирования $\Delta n_{\text{ст}}$ – с 0,5 до 0,15% (в 3,3 раза).

Список источников

1. Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals / J.B. Heywood. – Second Edition. – New York: McGraw-Hill Education, 2018. – 1721 p.

2. Folkson, R. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance / R. Folkson, S. – Sapsford. Sawston, Cambridge: WoodheadPublishing, 2022. – 798 p.
3. Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 101200 - "Двигатели внутреннего сгорания", направлению 651200 - "Энергомашиностроение" / Л. В. Грехов. – 2-е издание. – Москва : Легион-Автодата, 2005. – 344 с. – ISBN 5-88850-187-5. – EDN QMKETX.
4. Марков, В. А. Проблемы и перспективы совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок / В. А. Марков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2024. – № 1(148). – С. 128-155. – EDN НКCYSS.
5. Марков, В. А. Тенденции совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок / В. А. Марков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2023. – № 1(144). – С. 97-126. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-1-97-126. – EDN DXCWRC.
6. A Hybrid End-to-End Control Strategy Combining Dueling Deep Q-network and PID for Transient Boost Control of a Diesel Engine with Variable Geometry Turbocharger and Cooled EGR / B. Hu, J. Li, S. Li, J. Yang // Energies. – 2019. –Vol. 12, Issue 19. – P. 3739.
7. Optimization of Air-Fuel Ratio Control of Fuel-Powered UAV Engine Using Adaptive Fuzzy-PID / Y. Wang, Y. Shi, M. Cai, W. Xu // Journal of the Franklin Institute. – 2018. – Vol. 355, Issue 17. – P. 8554-8575.
8. Design and Optimization of a Novel Electrically Controlled High Pressure Fuel Injection System for Heavy Fuel Aircraft Piston Engine / K. Zhang, X. Huang, X.I.E. Zhifeng, M. Zhou // Chinese Journal of Aeronautics. – 2018. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1920-1928.
9. Автоматизация настройки ПИ-регулятора системы управления давлением топлива в аккумуляторной топливной системе дизеля / П. В. Душкин, А. А. Савастенко, С. С. Ховренко [и др.] // Двигателестроение. – 2023. – № 1(291). – С. 51-63. – DOI 10.18698/jec.2023.1.51-63. – EDN YTHNPQ.
10. Разработка быстродействующей модели для проверки алгоритмов управления дизельной аккумуляторной топливной системой / Л. Н. Голубков, П. В. Душкин, А. А. Савастенко [и др.] // Двигателестроение. – 2024. – № 3(297). – С. 14-20. – EDN ESYBXQ.
11. Расчетные исследования динамических качеств комбинированной силовой установки с поршневым двигателем / В. А. Марков, Ф. Б. Барченко, О. Н. Слепцов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 2(767). – С. 70-86. – EDN DKZMUV.

12. Поздняков, Е.Ф. Анализ эффективности использования регулятора частоты вращения с последовательно включёнными корректирующими звеньями в дизельном двигателе дизель-генераторной установки: специальность: 05.04.02: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Поздняков Е.Ф.; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2009. – 150 с.
13. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя / В. А. Марков, Е. Ф. Поздняков, В. В. Фурман, С. В. Плахов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 7(712). – С. 35-46. – DOI 10.18698/0536-1044-2019-7-35-46. – EDN RNVPOA.
14. Среда динамического моделирования технических систем *SimInTech*: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
15. Щекатуров, А.М. *SimInTech*: методика моделирования динамики паротурбинной установки / А.М. Щекатуров, А.Р. Корсаков. – Москва: ДМК Пресс, 2021. – 242 с.

References

1. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Second Edition, New York, McGraw-Hill Education, 2018, 1721 p.
2. Folkson R., Sapsford S. Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, Sawston, Cambridge, WoodheadPublishing, 2022, 798 p.
3. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* (Fuel Equipment and Diesel Control Systems), Moscow, Legion-Avtodata, 2005, 344 p.
4. Markov V.A. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye*, 2024, no. 1, pp. 128-155.
5. Markov V.A. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye*, 2023, no. 1, pp. 97-126.
6. Hu B., Li J., Li S., Yang J. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 19, pp. 3739.
7. Wang Y., Shi Y., Cai M., Xu W. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, vol. 355, iss. 17, pp. 8554-8575.
8. Zhang K., Huang X., Zhifeng X.I.E., Zhou M. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, vol. 31, iss. 9, pp. 1920-1928.
9. Dushkin P.V., Savastenko A.A., Khovrenok S.S., Kremnev V.V., Medin F.A. *Dvigatelaystroyeniye*, 2023, no. 1, pp. 51-63.
10. Golubkov L.N., Dushkin P.V., Savastenko A.A., Kosenkov A.S., Korolev P.A. *Dvigatelaystroyeniye*, 2024, no. 3, pp. 14–20.
11. Markov V.A., Barchenko F.B., Sleptsov O.N., Trifonov V.L., Ostroukhov A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2024, no 2, pp. 70-86.

12. Pozdnyakov E.F. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya regulatora chastoty vrashcheniya s posledovatel'no vklyuchyonnymi korrrektiruyushchimi zven'yami v dizel'nom dvigatele dizel'-generatornoj ustanovki (Analysis of the Efficiency of Using a Rotational Speed Controller with Sequentially Connected Correction Links in a Diesel Engine of a Diesel Generator Set). Candidate's thesis, Moscow, BMSTU, 2009, 150 p.
13. Markov V.A., Pozdnyakov E.F., Furman V.V., Plakhov S.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2019, no 7, pp. 35-46.
14. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (The Environment of Dynamic Modeling of SimInTech Technical Systems: A Workshop on Modeling Automatic Control Systems), Moscow, DMK Press, 2017, 424 p.
15. Shchekaturov A.M., Korsakov A.R. *SimInTech: metodika modelirovaniya dinamiki paroturbinoj ustanovki* (SimInTech: A Methodology for Modeling the Dynamics of a Steam Turbine Installation), Moscow, DMK Press, 2021, 242 p.

Рецензент: С.В. Путинцев, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Информация об авторах

Марков Владимир Анатольевич, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Барченко Филипп Борисович, канд. техн. наук, доц., МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Поздняков Евгений Федорович, канд. техн. наук, зав. лаб., МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Слепцов Олег Николаевич, канд. техн. наук, доц., МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Смоликов Ярослав Вадимович, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Information about the authors

Markov Vladimir A., Doctor of Sciences (Technical), professor, BMSTU.
Barchenko Philip B., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, BMSTU.
Pozdnyakov Evgeniy F., Candidate of Sciences (Technical), head of the laboratory, BMSTU.
Sleptsov Oleg N., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, BMSTU.
Smolikov Yaroslav V., student, BMSTU.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 25.06.2025.
The article was submitted 15.02.2025; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 25.06.2025.