

УДК 623

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_121

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 12ЧН 15/18, ОСНАЩЕННОГО ГИДРОПРИВОДОМ
АГРЕГАТА ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА**

**SIMULATION MODELING OF A 12CHN 15/18 DIESEL ENGINE EQUIPPED
HYDRAULIC DRIVE FOR A GAS TURBINE SUPERCHARGER UNIT**

С.В. Ершов

S.V. Ershov

Филиал ВА МТО им. А.В. Хрулева (г. Омск)

В статье представлены результаты разработки имитационной модели дизельного двигателя 12ЧН 15/18, оснащенного нерегулируемым турбокомпрессором. Детально описан процесс поэтапного создания модели, а также выполнена процедура ее верификации по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния модернизации системы наддува на динамические качества дизельного двигателя, имитационная модель была дополнена модулем, моделирующим работу устройства вспомогательного раскручивания вала турбокомпрессора с использованием гидротурбины Пельтона. Полученные с помощью модернизированной модели разгонные характеристики двигателя позволяют оценить эффективность предложенного технического решения.

Ключевые слова: дизельный двигатель, турбокомпрессор, имитационная модель, гидротурбина Пельтона, переходный процесс.

The article presents the results of developing a simulation model of a 12CHN 15/18 diesel engine equipped with a non-adjustable turbocharger. The process of step-by-step creation of the model is described in detail, and the procedure for its verification based on the results of experimental studies is performed. To study the effect of the turbocharging system upgrade on the dynamic qualities of the diesel engine, the simulation model was supplemented with a module simulating the operation of the auxiliary turbocharger shaft spin-up device using a Pelton hydraulic turbine. The acceleration characteristics of the engine obtained using the upgraded model allow us to evaluate the effectiveness of the proposed technical solution.

Keywords: diesel engine, turbocharger, simulation model, Pelton turbine, transient process.

Характерной проблемой современных дизельных двигателей, оснащенных нерегулируемым газотурбинным наддувом, является ухудшение динамики их разгона, обусловленное инерционностью ротора турбокомпрессора. Оценка эффективности применения в агрегате газотурбинного наддува дизельного двигателя 12ЧН 15/18 вспомогательного гидравли-

ческого привода с высокоскоростным колесом Пельтона [1–4] требует анализа сложной системы нелинейных дифференциальных уравнений, основанной на фундаментальной математической модели динамики дизельного двигателя, описывающей работу поршневой части, его впускных и выпускных устройств и агрегатов наддува [5, 6]:

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_i - M_{\pi} - M_c}{J_d};$$

$$\frac{d\omega_{\text{ТК}}}{dt} = \frac{M_{\text{Т}} - M_{\text{К}}}{J_{\text{ТК}}};$$

$$\frac{dp_{\text{К}}}{dt} = \frac{R_{\text{в}} \cdot T_{\text{К}}}{V_{\text{ВП}}} (G_{\text{К}} - G_{\text{д}});$$

$$\frac{dp_{\text{Г}}}{dt} = \frac{R_{\text{Г}} \cdot T_{\text{Г}}}{V_{\text{ВЫП}}} (G_{\text{д}} + G_{\text{ТОПЛ}} - G_{\text{Т}}),$$

где ω_d — угловая скорость коленчатого вала двигателя;

t — время;

M_i — индикаторный крутящий момент дизельного двигателя;

M_{π} — момент внутренних потерь в дизельном двигателе;

M_c — момент сопротивления на коленчатом вале двигателя;

J_d — приведенный момент инерции двигателя и потребителя;

$\omega_{\text{ТК}}$ — угловая скорость ротора ТКП;

$M_{\text{Т}}$ — крутящий момент, развиваемый турбиной ТКП;

$M_{\text{К}}$ — крутящий момент, необходимый для привода компрессора;

$J_{\text{ТК}}$ — приведенный момент инерции ротора ТКП;

$p_{\text{К}}$ — давление, создаваемое компрессором;

$R_{\text{в}}$ — газовая постоянная воздуха;

$T_{\text{К}}$ — температура воздуха на выходе из компрессора;

$G_{\text{К}}$ — массовый расход воздуха через компрессор;

$G_{\text{д}}$ — массовый расход воздуха через поршневую часть дизельного двигателя;

$V_{\text{ВП}}$ — объем впускного коллектора;

$p_{\text{Г}}$ — давление отработавших газов в выпускном коллекторе двигателя;

$R_{\text{Г}}$ — газовая постоянная отработавших газов;

$T_{\text{Г}}$ — температура газов перед турбиной ТКП;

$G_{\text{ТОПЛ}}$ — массовый расход топлива дизельным двигателем;

$G_{\text{Т}}$ — массовый расход газа через турбину;

$V_{\text{ВЫП}}$ — объем выпускного коллектора.

Решение таких уравнений традиционными методами крайне затруднительно. MATLAB/Simulink как современный инструмент имитационного моделирования существенно упрощает реализацию и расчет подобных моделей, благодаря встроенным библиотекам компонентов [7, 8]. В данной статье представлена верифицированная модель в Simulink R2024a, позволяющая исследовать влияние гидропривода на разгонные характеристики дизельного двигателя 12ЧН 15/18 и оценить эффективность такого способа снижения длительности переходного процесса системы «ДВС — турбокомпрессор».

Имитационное моделирование построено по следующему плану:

– построение имитационной модели существующего двигателя 12ЧН 15/18 в среде Simulink MATLAB R2024a, ее верификация по результатам экспериментальных исследований;

– дополнение имитационной модели двигателя моделью устройства, раскручивающего вал ротора турбокомпрессора гидротурбиной Пельтона, получение разгонных характеристик до и после модернизации.

Для реализации плана и управления процессами моделирования разработан Live-script в среде MATLAB R2024a.

Имитационная модель двигателя построена с учетом следующих ограничений и допущений:

– разгон двигателя осуществляется в диапазоне от 1300 до 2000 мин⁻¹, что соответствует частоте вращения коленчатого вала при максимальном крутящем моменте и максимальной мощности соответственно;

– нагрузка на двигатель осуществляется дискретно, со значениями 100, 80, 60, 40 и 0 процентов от номинала по нагрузочной характеристике при частоте вращения 2000 мин⁻¹;

– функции изменения коэффициента избытка воздуха, подаваемого на вход модели, получены по результатам интерполяции результатов натурных измерений, полученных при указанных выше нагрузках, и не изменяются при увеличении динамики разгона ротора турбокомпрессора (экспериментальные данные, полученные на ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» в 2020 году при определении скоростной, нагрузочных и характеристики холостого хода дизельного двигателя 12ЧН 15/18, а также расчетные данные, полученные в программном комплексе «Дизель-РК»

разработчик А.С. Кулешов, МГТУ им. Баумана) [9];

– зависимости степени наддува от частоты вращения ротора турбокомпрессора и массового расхода воздуха получены методом линейной регрессии результатов измерений при испытаниях существующего турбокомпрессора ТКР 337-300СБ № 2Ш03АТ0503 (характеристики турбокомпрессора в точках совместной работы с двигателем 12СН 15/18 на номинальном режиме и режиме максимальной мощности получены в ходе безмоторных испытаний в ГСКБД «Турбина» в 2017 году) [10];

– внешние условия в процессе моделирования остаются постоянными;

– моделирование происходит с шагом 0,001 с, что во много раз больше несущей частоты и выполняет требования к частоте дискретизации аналоговых сигналов по теореме Котельникова;

– в качестве решателя выбран алгоритм с постоянным шагом вычисления.

Имитационная модель содержит следующие блоки моделирования: тепловой расчет двигателя, поршневая часть двигателя, расчет характеристик компрессора, расчет характеристик турбины; механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона; расчет характеристик гидротурбины Пельтона; элементы для верификации с результатами натурного эксперимента.

Тепловой расчет двигателя

Тепловой расчет двигателя осуществляется в блоке, являющимся внутренней функцией MATLAB. Как видно из рис. 1, блок принимает

на вход текущие значения: частоты вращения коленчатого вала двигателя, коэффициента избытка воздуха, температуры воздуха на выходе из компрессора, давления отработавших газов в выпускном коллекторе двигателя, температуры газов перед турбиной ТКП, давления, создаваемого компрессором.

На выход из блока подаются значения: эффективного крутящего момента, секундного массового расхода воздуха, эффективной мощности.

Внутри блока происходит расчет тепловых процессов двигателя, в результате которого вычисляется среднее эффективное давление, и на его основании остальные выходные текущие параметры.

Поршневая часть двигателя

Блок «Поршневая часть двигателя» выполнен с использованием элементов библиотеки Simscape Simulink и предназначен для имитации динамических процессов в механической системе двигателя: влияние инерции, вязкостного и сухого трения на динамику разгона двигателя (рис. 2).

На вход блок принимает текущие значения крутящего момента, рассчитанного в блоке Тепловой расчет двигателя, а также коэффициент нагрузки, создаваемой испытательным стендом. На выходе из блока — текущая частота вращения коленчатого вала двигателя.

Расчет характеристик компрессора

Блок «Расчет характеристик компрессора» выполнен в виде функции MATLAB (рис. 1), которая принимает на вход текущие значения

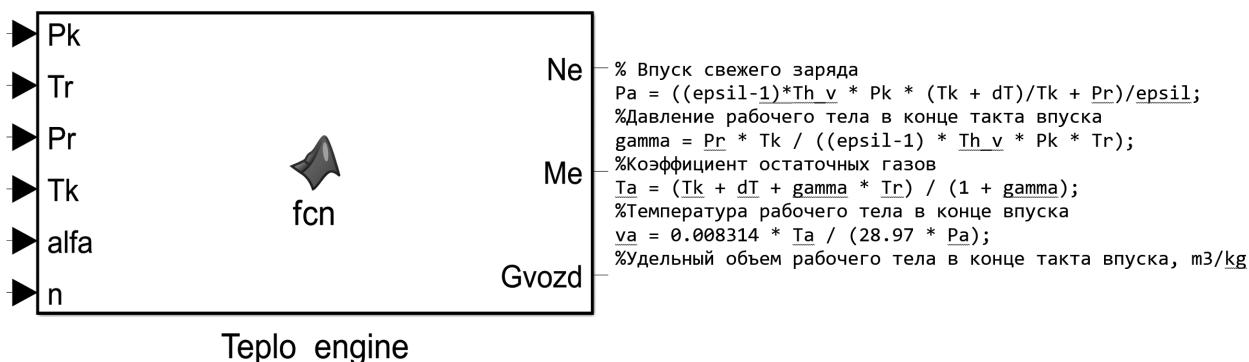


Рис. 1. Блок «Тепловой расчет двигателя» и фрагмент содержимого функции

частоты вращения вала ротора компрессора, секундный массовый расход воздуха, температуру и давление забираемого из атмосферы воздуха, частоту вращения коленчатого вала двигателя.

Степень повышения давления вычисляется с помощью регрессионной модели (табл. 1), рассчитанной по результатам экспериментальных значений параметров турбокомпрессора ТКР 337-100СБ (получены в отделе ГСКБД на безмоторном стенде и при проверке параметров наддува в составе двигателя 12ЧН 15/18). Результаты регрессионного анализа сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значения «Р-Значение» $< 0,05$ для всех факторов, что с доверительной вероятностью 0,95 говорит о высокой статистической значимости каждого из них.

Расчет характеристик турбины

Блок «Расчет характеристик турбины» (рис. 3) принимает на вход текущие значения мас-

сового расхода воздуха, удельную адиабатическую работу сжатия компрессором, температуру отработавших газов, поступающих на вход турбины, давление воздуха на выходе из турбины и коэффициент избытка воздуха. На выходе из блока получено давление отработавших газов перед турбиной и мощность, создаваемая турбиной для раскрутки вала ротора компрессора.

Внутри блок «Расчет характеристик турбины» содержит: блок вычисления расхода отработавших газов через турбину, блок вычисления давления перед турбиной, функцию расчета мощности.

Верификация имитационной модели

Для оценки правильности подбора коэффициентов в модель введены блоки верификации:

- разгонная характеристика двигателя до модернизации (рис. 4);
- внешняя скоростная характеристика двигателя.

Таблица 1

Результаты регрессионного анализа

Фактор	Коэфф. регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	Р-Значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Смещение	-2,18680350	0,171215771	-12,772	1,039E-12	-2,538	-1,834
n , мин ⁻¹	0,000133633	7,00196E-06	19,085	8,155E-17	0,000119	0,000148
$G_{в.пр}$	-1,13682310	0,175906786	-6,462	7,54E-07	-1,498	-0,775

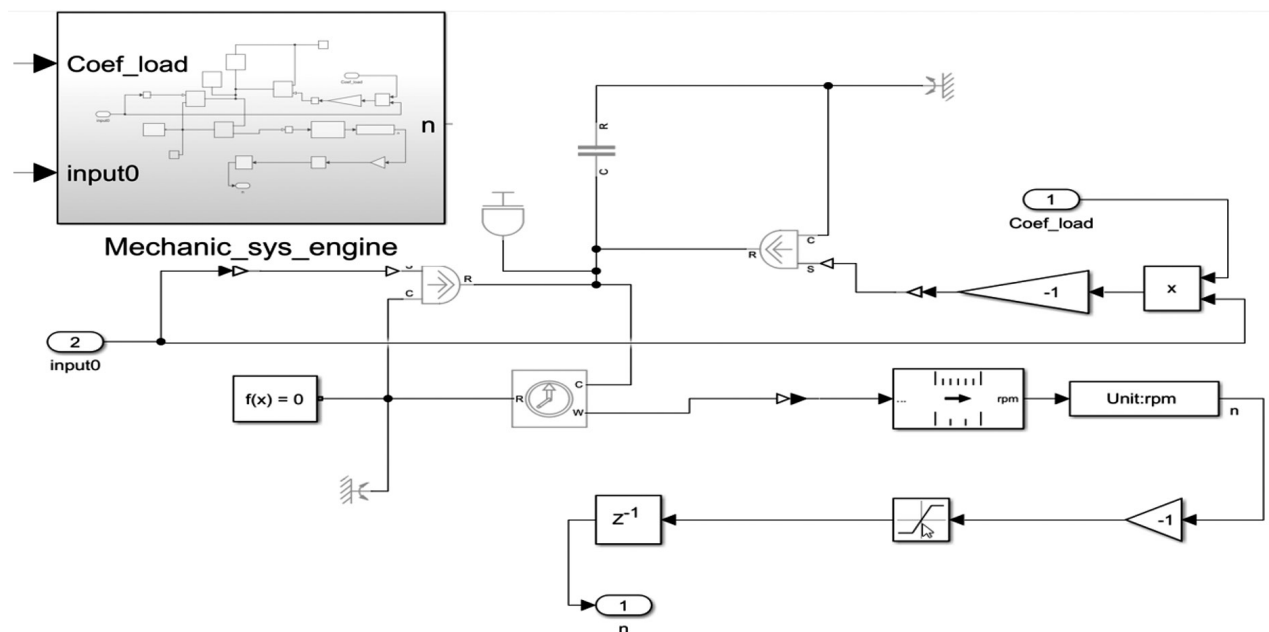


Рис. 2. Блок «Поршневая часть двигателя» и его содержимое

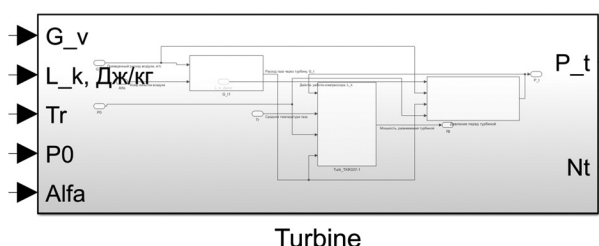


Рис. 3. Блок «Расчет характеристик турбины» и его содержимое

Блок «Разгонная характеристика двигателя до модернизации» выдает в зависимости от заданного извне значения нагрузки, разгонную характеристику, полученную опытным путем.

Результаты эксперимента аппроксимированы полиномами второй степени и записаны в виде функций, как показано на табл. 2.

Блоки внешней скоростной характеристики (рис. 5) получены путем интерполяции табличных значений результатов натурального эксперимента при различных нагрузках. На вход принимают значения частоты вращения коленчатого вала двигателя и процент нагрузки. На выходе получаем значение эффективной мощности, крутящего момента.

Верификация построенной имитационной модели двигателя производилась без учета влияния турбины Пельтона путем сравнения характе-

ристик, полученных моделированием, с результатами натуральных экспериментов:

- внешней скоростной характеристики (ВСХ);
- разгонных характеристик на нагрузках 100, 80, 60, 40 и 0 процентов.

Для верификации по внешней скоростной характеристике в LiveScript запускалась модель без турбины Пельтона, извлекались результаты моделирования, строилась внешняя скоростная характеристика (рис. 6).

Оценка сходимости ВСХ по результатам модельного и натурального эксперимента производилась по среднему квадратическому отклонению результатов модельного и натурального экспериментов.

Среднее квадратическое отклонение эффективной мощности, полученной моделированием, от результатов эксперимента составило 2,69 кВт, что дает основание сделать вывод об адекватном описании процессов в имитационной модели.

Для верификации по разгонным характеристикам в LiveScript запускалась модель без турбины Пельтона, извлекались результаты моделирования, строились разгонные характеристики при нагрузках 100, 80, 60, 40 и 0 процентов (рис. 7).

Оценка сходимости разгонной характеристики при различных режимах нагрузки по ре-

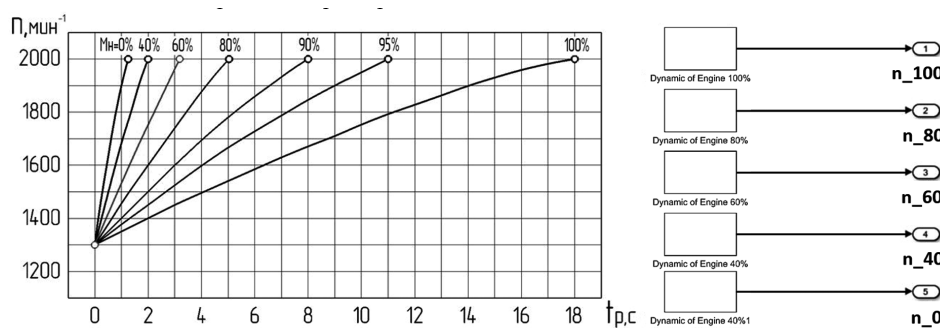


Рис. 4. Блок разгонной характеристики

Результаты регрессионного анализа

Нагрузка, %	Уравнение регрессии	R^2
100 %	$y = -0,6981x^2 + 51,653x + 1299,7$	0,9997
80 %	$y = -3,1513x^2 + 154,22x + 1303,7$	0,9992
60 %	$y = -11,905x^2 + 250,71x + 1301,2$	0,9995
40 %	$y = -42,857x^2 + 435,71x + 1298,6$	0,9995
0 %	$y = -37,852x^2 + 668,75x + 1301,1$	0,9992

Таблица 2

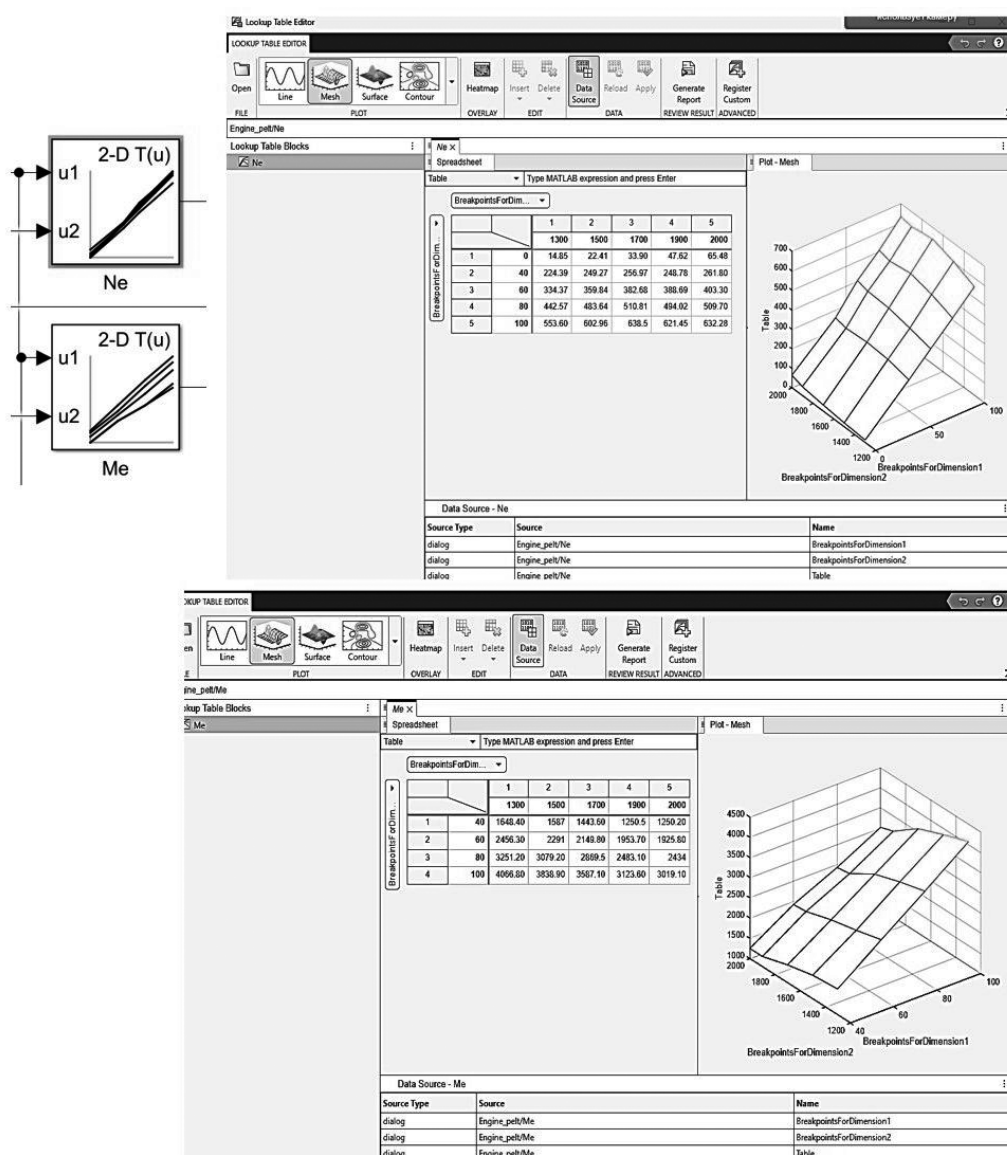


Рис. 5. Блоки внешней скоростной характеристики, полученные экспериментальным путем

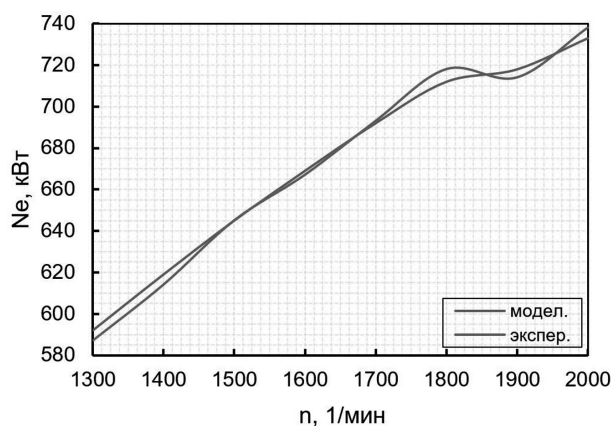


Рис. 6. Сравнение N_e по внешней скоростной характеристике двигателя 12ЧН 15/18 по результатам модельного и натурного экспериментов

результатам модельного и натурного эксперимента производилась по среднему квадратическому отклонению результатов модельного и натурного экспериментов.

Среднее квадратическое отклонение частоты вращения коленчатого вала двигателя, полученной моделированием, от результатов эксперимента составило: $12,6 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 100 %; $24,0 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 80 %; $6,0 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 60 %; $8,6 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 40 %; $42,3 \text{ мин}^{-1}$ — при нагрузке 0 %.

Таким образом, как следует из рис. 7, среднеквадратическое отклонение результатов модельного эксперимента от натурного не превышает 5 % от минимального значения измеряемых величин, что говорит о достаточной адекватности построенной имитационной модели.

Построенная имитационная модель серийного двигателя 12ЧН 15/18 в среде Simulink MATLAB R2024a после ее верификации была дополнена моделью устройства, раскручивающего вал ротора турбокомпрессора гидротурбины Пельтона. В имитационную модель введены следующие блоки моделирования:

- механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона;
- расчет характеристик гидротурбины Пельтона.

Блок «Механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона» (рис. 8) служит для имитации механических процессов динамики разгона ротора турбокомпрессора и выполнен с использованием библиотеки механических компонентов Simscape.

Блок принимает на вход суммарный крутящий момент от газовой турбины, компрессора и турбины Пельтона. На выход выдается текущая угловая скорость ротора.

Блок «Расчет характеристик гидротурбины Пельтона» (рис. 9) принимает на вход текущие значения частоты вращения коленчатого вала двигателя, угловую скорость вала ротора турбокомпрессора, на выход выдается крутящий момент, создаваемый гидротурбиной Пельтона, а также момент, отбираемый масляным насосом от двигателя.

Блок, кроме вычислительных элементов сигналов, содержит в себе элементы механической

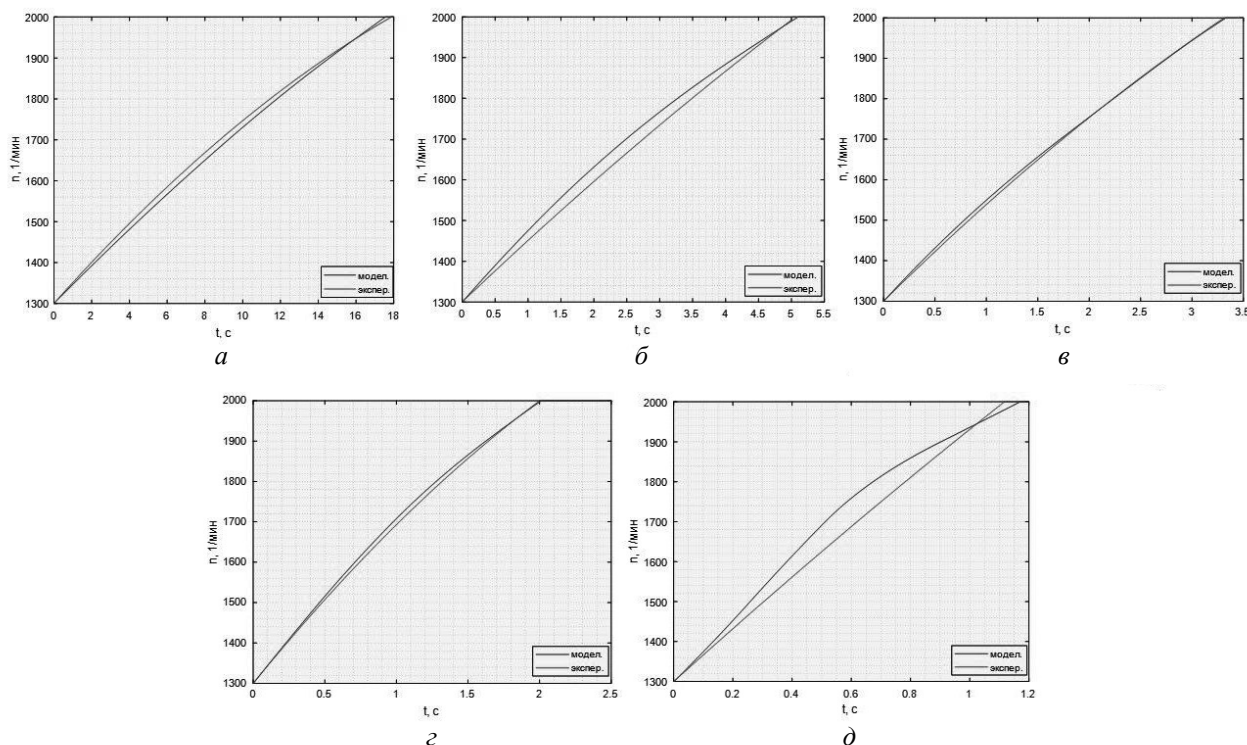


Рис. 7. Сравнение разгонных характеристик двигателя 12ЧН 15/18 по результатам модельного и натурного экспериментов при различных режимах нагрузки:

а — 100 %; б — 80 %; в — 60 %; г — 40 %; д — 0 %

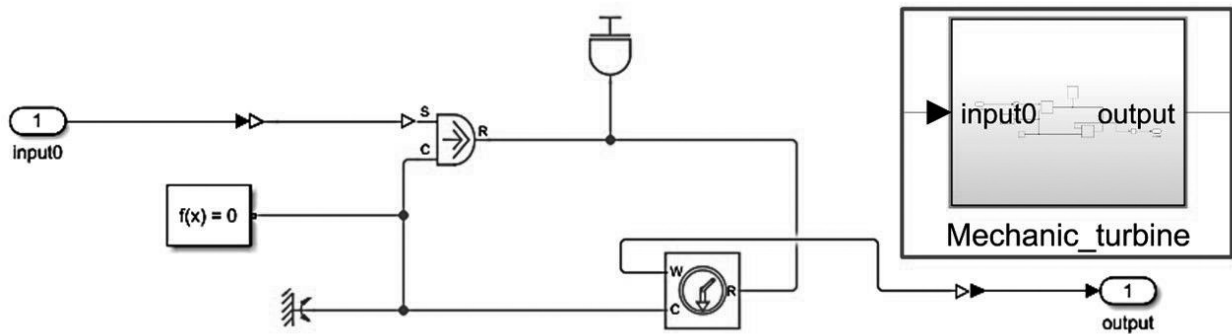


Рис. 8. Блок «Механическая система компрессор-турбина-гидротурбина Пельтона» и его содержимое

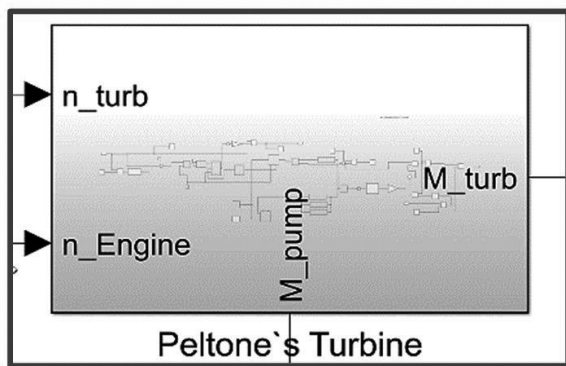


Рис. 9. Блок «Расчет характеристик турбины Пельтона»

библиотеки Simscape, а также элементы гидравлической библиотеки. Механическая часть получает на вход значения частоты вращения коленчатого вала двигателя, которое преобразуется редуктором и передается на насос. Система имеет возможность отключения насоса по значению частоты вращения коленчатого вала. Созданное насосом давление передается в гидравлическую часть, в которой имитируется гидравлическое сопротивление в трубопроводах и трех форсунок турбины Пельтона. Значения массового расхода масла и его давление на выходе из форсунок далее преобразуются в скорость истечения, а затем, с учетом текущей скорости колеса — в силу давления на лопатки. Последняя преобразуется в крутящий момент, который с учетом редуктора подается на выход из блока.

Таким образом, разработана и верифицирована детализированная имитационная модель дизельного двигателя 12ЧН 15/18 в MATLAB/Simulink. Адекватность модели подтверждена малыми отклонениями от натурных экспериментов по внешней скоростной характеристике

(2,69 кВт) и разгонным характеристикам ($<42,3 \text{ мин}^{-1}$, $<5 \%$). Интеграция в модель системы наддува устройства на основе гидротурбины Пельтона, преобразующего гидравлическую энергию потока штатного масляного насоса в механическую работу для раскрутки ротора ТКП, позволяет получить разгонные характеристики модернизированного двигателя. Предварительный анализ полученных характеристик указывает на потенциальное улучшение динамики разгона. Предложенный способ и имитационная модель представляют практический интерес для повышения приемистости дизельных двигателей с газотурбинным наддувом (ГТН) в условиях переменных нагрузок. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию параметров гидропривода, экспериментальную проверку эффективности модернизации и оценку ее экономической целесообразности.

Список источников

1. Устройство для повышения эффективности агрегата наддува силовой установки танка: пат. 2837174 С1 Рос. Федерация, № 2024128039; заявл. 23.09.2024; опубл. 26.03.2025, Бюл. № 9. 9 с.
2. Агрегат наддува силовой установки танка: пат. 230468 U1 Рос. Федерация, № 2024128281; заявл. 25.09.2024; опубл. 05.12.2024, Бюл. № 34. 8 с.
3. Турбокомпрессор дизельного двигателя военной гусеничной машины с устройством для разгона танка: пат. 214066 U1 Рос. Федерация: № 2022114629; заявл. 30.05.2022; опубл. 11.10.2022, Бюл. №29. 7 с.
4. Устройство для разгона ротора турбокомпрессора силовой установки танка: пат. 2784830

С1 Рос. Федерация № 2022114630: заявл. 30.05.2022: опубл. 30.11.2022, Бюл. № 34. 9 с.

5. Крутов В.И., Рыбальченко А.Г. Регулирование турбонаддува ДВС: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 212 с.

6. Крутов В.И., Шатров В.И. Некоторые результаты экспериментального исследования переходных процессов дизеля с турбонаддувом // Известия вузов. Машиностроение. 1965. № 12. С. 23–26.

7. MathWorks. Simscape User's Guide (R2024a). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape> (дата обращения: 02.07.2025).

8. Овинников А.А. Основы работы в средах MATLAB и Simulink: учеб. пособие. М.: КУРС, 2025. 137 с. Текст: электронный. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2192127> (дата обращения: 02.07.2025).

9. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: диссертация докт. техн. наук., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2011. 235 с.

10. Техническая справка о результатах испытаний турбокомпрессоров 337-100СБ и 4353.00.000, ЧТЗ-УРАЛТРАК», Челябинск, 2020. 5 с.

References

1. Ustrojstvo dlya povu'sheniya e'ffektivnosti agregata nadduva silovoj ustanovki tanka: 2837174 S1 Ros. Federaciya: zayavl. 23.09.2024: opubl. 26.03.2025.

2. Agregat nadduva silovoj ustanovki tanka: pat. № 230468 U1 Ros. Federaciya: zayavl. 25.09.2024: opubl. 05.12.2024.

3. Turbokompressor dizel'nogo dvigatelya voennoj gusenichnoj mashiny` s ustroystvom dlya razgona tanka: pat. 214066 U1 Ros. Federaciya: zayavl. 30.05.2022: opubl. 11.10.2022.

4. Ustrojstvo dlya razgona rotora turbo-kompressora silovoj ustanovki tanka: pat. 2784830 S1 Ros. Federaciya: zayavl. 30.05.2022: opubl. 30.11.2022.

5. Krutov V.I., Ry`bal`chenko A.G. Regulirovanie turbonadduva DVS / Uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Vy`sshaya shkola, 1978. 212 p.

6. Krutov V.I., Shatrov V.I. Nekotory`e rezul`taty` e`ksperimental'nogo issledovaniya perexodny`x processov dizelya s turbonadduvom // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 1965. No 12. Pp. 23–26.

7. MathWorks. Simscape User's Guide (R2024a). [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape> (data obrashheniya: 02.07.2025).

8. Ovinnikov A.A. Osnovy` raboty` v sredax MATLAB i Simulink : uchebnoe posobie. Moskva: KURS, 2025. 137 P. Tekst: e`lektronny`j. URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2192127> (data obrashheniya: 02.07.2025).

9. Kuleshov A.S. Razvitie metodov rascheta i optimizaciya rabochix processov DVS. Dissertaciya dokt. texn. nauk., MGTU im. N.E`.Baumana, Moskva, 2011. 235 p.

10. Texnicheskaya spravka o rezul`tatax ispy`tanij turbokompressorov 337-100SB i 4353.00.000, ChTZ-URALTRAK», Chelyabinsk, 2020. 5 p.