

УДК 621.436

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-50-58

Исследование методов интенсификации переходных процессов дизель-генератора

А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов, Ин Лю

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

A Study of Methods of Intensification of Transient Processes in a Diesel-Generator

A.G. Kuznetsov, S.V. Kharitonov, Liu Ying

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: kuzag441@mail.ru, devilfess@mail.ru, 1548364742@qq.com



Обеспечение высоких требований по таким показателям переходных процессов, как максимальное отклонение частоты вращения и длительность процесса при набросе нагрузки, является актуальной задачей для предприятий, выпускающих дизель-генераторы. Рассмотрены два метода интенсификации переходных процессов: подбор коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования в регуляторе частоты вращения и использование системы приемистости для улучшения воздухообеспечения дизеля. В качестве объекта исследования выбран дизель-генератор на базе дизельного двигателя типа Д49. Для проведения расчетного исследования переходных процессов в программном комплексе GT-Power составлена компьютерная модель рассматриваемого дизель-генератора. В результате моделирования процессов наброса нагрузки определены значения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования, при которых обеспечивается интенсивное воздействие регулятора частоты вращения на топливоподачу. Для анализа эффективности применения системы приемистости выполнено моделирование методов воздействия на воздухообеспечение дизеля путем подвода дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора и дополнительного воздуха во впускной трубопровод двигателя и непосредственно в цилиндры. Показаны возможности интенсификации переходных процессов дизель-генератора для каждого из рассмотренных методов.

Ключевые слова: дизель-генератор, переходный процесс, регулятор частоты вращения, система приемистости, компьютерная модель



Manufacturers of diesel-generators strive to meet the high requirements to such transient process indicators as the maximum speed deviation and the duration of the process under load surge. In this paper, two methods of intensifying transient processes are considered: the selection of the proportional-integral-differential coefficients of the control law in the speed regulator and the use of the responsiveness system to improve the air supply of the diesel engine. The object of the study is a diesel-generator based on a D49 diesel engine. To carry out a computational study of transient processes in the GT-Power software package, a computer model of the diesel generator under consideration is compiled. As a result of simulation of the load build-up processes, the values of coefficients of the proportional-integral-differential control law are determined, under which the intensive effect of the speed controller on the fuel supply is provided. To analyze the efficiency of the use of the responsiveness system, the following methods of influencing the air supply in a diesel

engine are simulated: the supply of additional energy to the turbocharger rotor, and the supply of additional air to the engine intake manifold and directly to the cylinders. The possibilities of intensification of the transient processes of the diesel-generator for each of the methods considered are shown.

Keywords: diesel-generator, transient process, speed controller, responsiveness system, computer model

Задачи и объект исследования. Наряду с традиционными экономическими и экологическими нормами, которым должны удовлетворять современные дизельные двигатели [1, 2], к дизель-генераторам стационарного типа предъявляются жесткие требования по таким показателям качества переходных процессов (ПП), как заброс частоты вращения δ и длительность ПП τ . Заброс, равный отношению максимального отклонения частоты вращения к ее номинальному значению, выражается в процентах. Длительность ПП определяется как интервал времени (c) от начала процесса до момента его последнего вхождения в зону допустимой нестабильности ν , задаваемой в процентах от номинальной частоты вращения.

Согласно действующему в Российской Федерации стандарту [3], по показателям качества ПП дизель-генераторы подразделяют на четыре класса точности, для которых заданы максимально допустимые значения заброса частоты вращения и длительности ПП при ступенчатом изменении нагрузки. Наиболее важный случай — резкий рост потребляемой генератором энергии (наброс нагрузки).

Обеспечение высоких требований по динамическим показателям работы дизель-генераторов требует интенсификации протекания ПП и является насущной и ответственной задачей для предприятий, выпускающих такие энергетические установки. Чтобы интенсифицировать ПП, дизель должен вырабатывать максимально возможную мощность при набросе нагрузки.

Для интенсификации ПП дизель-генераторов проводится совершенствование системы автоматического регулирования (САР) частоты вращения, направленное на быстрое возрастание цикловой подачи топлива при повышении нагрузки. В случае применения в регуляторе частоты вращения (РЧВ) пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона регулирования [4] совершенствование САР заключается в подборе коэффициентов составляющих этого закона. Можно также использо-

вать комбинированное регулирование с введением в РЧВ сигнала по нагрузке генератора [5].

Однако для дизельных двигателей с газотурбинным наддувом существует проблема снабжения достаточным количеством воздуха, требуемым для качественного сгорания большого объема топлива. Эта проблема возникает из-за недостаточных динамических свойств турбокомпрессоров, которые вследствие высокой механической инерционности не способны повышать расход воздуха синхронно с увеличением подачи топлива. В связи с этим возникает необходимость в применении системы приемистости, интенсифицирующей функционирование системы воздухообеспечения двигателя [6].

Объектом исследования выбрана 16-цилиндровая модификация 16ЧН26/26 дизельного двигателя Д49 производства ОАО «Коломенский завод», часто используемая в качестве источника энергии дизель-генераторных установок. Проблема обеспечения качества ПП дизеля Д49 в составе генераторной установки является актуальной задачей этого предприятия. Однако экспериментальная оценка различных методов интенсификации ПП требует значительных материальных и временных затрат.

Цель работы — анализ методов интенсификации ПП путем расчетного исследования.

Компьютерная модель САР. Для проведения расчетного исследования дизель-генератора с двигателем 16ЧН26/26 разработана компьютерная программа. В настоящее время существует ряд программных комплексов (ПК), применяемых для моделирования режимов работы двигателей [7–12]. Анализ ПК показывает, что большинство из них ориентированы на вычисление параметров двигателей на установленных режимах работы. Такие ПК базируются на подробном расчете процессов сгорания топлива и теплообмена в цилиндре и течения воздуха и отработавших газов во впускной и выпускной системах, что необходимо для проектирования двигателей и доводки их конструкции и рабочего процесса [7–9].

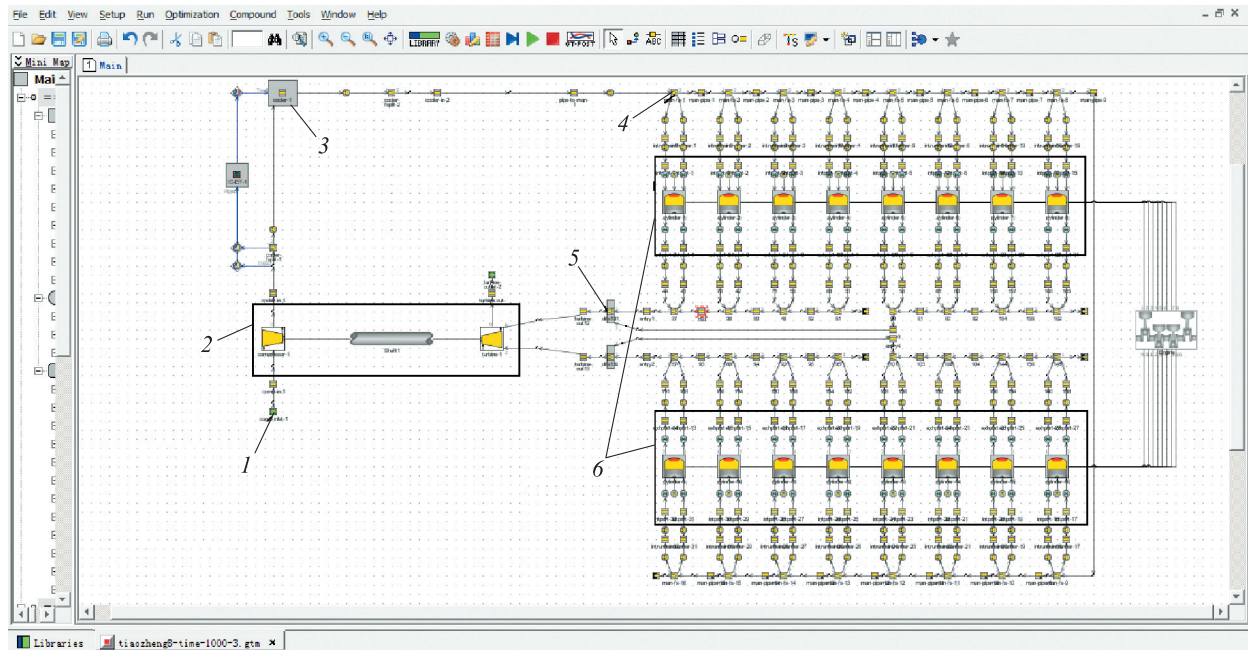


Рис. 1. Компьютерная модель САР дизеля:

1 — окружающая среда; 2 — турбокомпрессор; 3 — охладитель надвучного воздуха; 4 — впускной трубопровод; 5 — выпускной трубопровод; 6 — 16 цилиндров

При проектировании САР наибольший интерес представляют неустановившиеся режимы работы двигателей. Для их расчета можно использовать математический аппарат теории автоматического регулирования на базе передаточных функций и типовых нелинейностей [10], однако такой упрощенный подход дает недостаточно точные результаты.

Другим вычислительным инструментом являются программы, составленные на базе динамических моделей, в которых не проводится подробный расчет циклов двигателя, а используются интегральные показатели в виде крутящих моментов и расходов газов [11]. Такие программы характеризуются высокой скоростью счета, что необходимо при полунатурном моделировании САР в реальном масштабе времени.

Развитие программных средств моделирования режимов функционирования двигателей идет в направлении создания ПК, сочетающих в себе как достаточно подробный расчет рабочего процесса на установившихся режимах, так и моделирование неустановившихся режимов. К таким программным продуктам относится ПК GT-Power [12], где наряду с расчетом рабочего процесса в цилиндрах двигателя и подробным моделированием течения в газоздушных трактах осуществляется расчет неустановив-

шихся режимов двигателя при изменении нагрузки. Как показал анализ, ПК GT-Power наиболее подходит для решения задачи, поставленной в рамках данного исследования.

Вид компьютерной модели САР рассматриваемого дизеля в ПК GT-Power показан на рис. 1.

Физическая картина процессов в элементах двигателя основана на представлении цилиндра, впускного и выпускного трубопроводов в виде незамкнутых термодинамических систем, обменивающихся массой и энергией. Параметры газа в этих системах описываются дифференциальными уравнениями сохранения массы и энергии и уравнением состояния. Решаются эти системы уравнений методами Эйлера или Рунге-Кутты 4-го порядка. Первый метод требует применения малых расчетных шагов, второй — четырехкратного решения уравнений при сравнительно крупном расчетном шаге. И то и другое приводит к значительным затратам машинного времени.

Для сокращения времени счета и сохранения высокой точности реализован метод повышенного быстродействия, базирующийся на пошаговом определении параметров газа в открытой термодинамической системе путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений, полученных преобразованием разностных урав-

нений балансов массы и энергии и уравнения состояния, записанных для произвольного термодинамического процесса. При составлении исходной системы разностных уравнений сделаны общепринятые в таких случаях допущения об однородности термодинамической системы, справедливости уравнения состояния идеального газа и зависимости свойств рабочего тела от состава и температуры.

Тепловыделение при сгорании топлива определяется по методу Вибе [13]. Процесс тепловыделения при сгорании подразделяется на три этапа: период задержки, кинетическую и диффузионную фазы.

Характеристики компрессора и турбины турбокомпрессора ТК38 в соответствии с форматом ПК GT-Power представлены в приведенных параметрах.

Изменения параметров двигателя на неустановившихся режимах получаются в результате решения дифференциальных уравнений динамического баланса крутящих моментов на вале дизеля и роторе турбокомпрессора и расходов воздуха и газов во впускном и выпускном трубопроводах с учетом инерционных свойств элементов двигателя.

В РЧВ заложен ПИД-закон регулирования, согласно которому изменение цикловой подачи топлива $g_{ц}$ во времени t в зависимости от отклонения частоты вращения от заданного режима Δn определяется как сумма трех составляющих:

$$g_{ц} = k \left(k_{п} \Delta n + k_{и} \int_0^t \Delta n dt + k_{д} \frac{dn}{dt} \right), \quad (1)$$

где k — общий множитель, влияющий на все составляющие закона регулирования; $k_{п}$, $k_{и}$ и $k_{д}$ — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования соответственно.

Сравнение полученных с помощью разработанной компьютерной программы ПП с имеющимися в информационных источниках экспериментальными данными по рассматриваемому дизель-генератору показало, что моделирование проведено с достаточной точностью, а программа пригодна для проведения расчетного исследования.

Исследование методов интенсификации ПП дизель-генератора. Это исследование проведено в два этапа. На первом осуществлен подбор коэффициентов составляющих ПИД-закона

регулирования для стабилизации частоты вращения, на втором — анализ способов улучшения воздухообеспечения дизеля системой приемистости. Номинальная частота вращения вала дизель-генератора $n = 750 \text{ мин}^{-1}$. Рассмотрены ПП изменения частоты вращения при набросе момента нагрузки генератора $M_{г} = 17\,000 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Согласно выражению (1), в ПИД-законе регулирования использованы коэффициенты $k_{п}$, $k_{и}$, $k_{д}$ и общий множитель k .

На первом этапе исследования выполнялся подбор коэффициентов пропорциональной $k_{п}$ и интегральной $k_{и}$ составляющих закона регулирования при неизменных значениях коэффициента дифференциальной составляющей $k_{д} = 10$ и общего множителя $k = 0,24$.

Как показал расчет параметров рабочего процесса, в ПП коэффициент избытка воздуха α уменьшается до недопустимо низких значений, при которых происходит интенсивное выделение дыма. Для устранения дымления в алгоритм работы РЧВ введена пневмокоррекция — ограничение подачи топлива в соответствии с давлением наддува. Принято, что минимально допустимое значение коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,4$.

На рис. 2 показаны ПП САР при подборе коэффициента пропорциональной составляющей закона регулирования с варьированием в диапазоне $100 < k_{п} < 220$. При этом коэффициент интегральной составляющей $k_{и} = 60$.

Как видно из рис. 2, увеличение коэффициента пропорциональной составляющей оказывает слабое воздействие на заброс частоты вра-

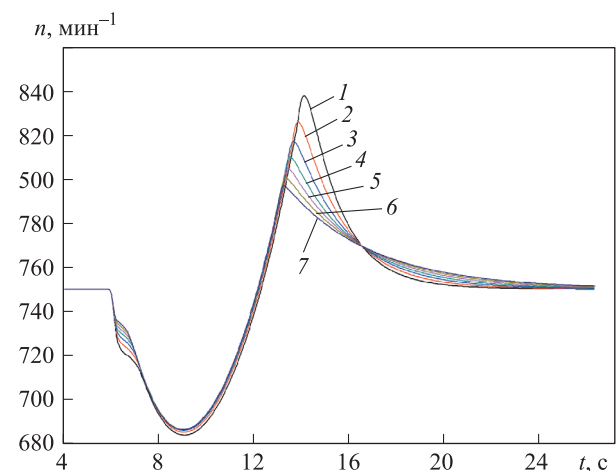


Рис. 2. ПП САР при подборе коэффициента пропорциональной составляющей закона регулирования:

1 — $k_{п} = 100$; 2 — $k_{п} = 120$; 3 — $k_{п} = 140$; 4 — $k_{п} = 160$;
5 — $k_{п} = 180$; 6 — $k_{п} = 200$; 7 — $k_{п} = 220$

щения, но снижает значение перерегулирования с одновременным затягиванием процесса. В качестве компромиссного варианта по влиянию на перерегулирование и длительность ПП выбран коэффициент $k_{\text{п}} = 140$.

Зависимость ПП САР от коэффициента интегральной составляющей показана на рис. 3. ПП рассчитаны при $k_{\text{и}} = 20$ (кривая 1) и $k_{\text{и}} = 40$ (кривая 2). Наилучшее качество процесса регулирования получено при $k_{\text{и}} = 20$.

Таким образом, по результатам первого этапа исследования приняты следующие коэффициенты ПИД-закона регулирования: $k_{\text{п}} = 140$, $k_{\text{и}} = 20$, $k_{\text{д}} = 10$, $k = 0,24$. Максимальное отклонение частоты вращения составило 55 мин^{-1} , что соответствует забросу $\delta = 7,3 \%$. При допустимой нестабильности $\nu = 0,6 \%$, которая соответствует 1-му классу точности САР по ГОСТ 10511–83, длительность ПП регулирования $\tau = 10 \text{ с}$; для 2-го класса точности ($\nu = 0,8 \%$) $\tau = 5,7 \text{ с}$.

Пневмокоррекция, ограничивая подачу топлива, приводит также к временному снижению мощности дизеля, в результате чего ухудшается качество ПП. Это можно наблюдать по процессам, приведенным на рис. 4, где для сравнения изображены ПП с пневмокоррекцией (кривая 1) и без нее (кривая 2). ПП без пневмокоррекции протекает быстрее, с меньшими значениями заброса и перерегулирования частоты вращения, однако сопровождается дымлением, недопустимым по экологическим требованиям. Пневмокоррекция является методом экстенсивного влияния на протекание ПП, поэтому ее нецелесообразно применять для дизель-генераторов. Здесь сле-

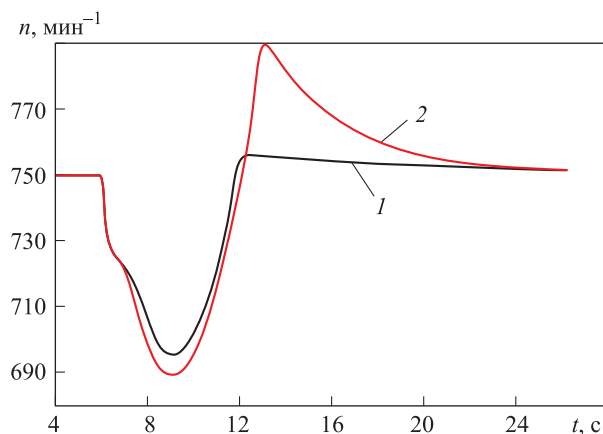


Рис. 3. ПП САР при подборе коэффициента интегральной составляющей закона регулирования: 1 — $k_{\text{и}} = 20$; 2 — $k_{\text{и}} = 40$

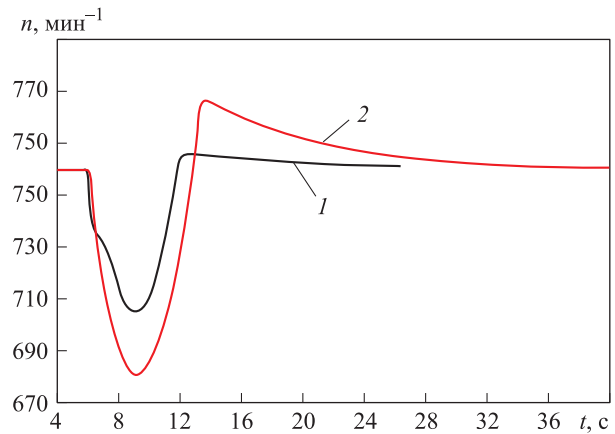


Рис. 4. ПП САР с пневмокоррекцией (1) и без нее (2)

дует использовать методы интенсификации процесса воздухообеспечения двигателя системой приемистости.

На втором этапе исследования рассмотрены три метода улучшения воздухообеспечения дизеля системой приемистости в ПП путем подвода дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора и дополнительного воздуха во впускной трубопровод двигателя и непосредственно в цилиндры. В настоящее время наиболее перспективным вариантом подвода дополнительной энергии к турбокомпрессору является подкрутка ротора электрической машиной, установленной на роторе. Подвод дополнительного воздуха осуществляется от баллонов со сжатым воздухом, пополняемых с помощью специального компрессора. Перечисленные методы исследованы во время ПП наброса нагрузки, когда частота вращения снижается относительно номинального значения (750 мин^{-1}) более чем на 10 мин^{-1} .

Подвод дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора. При номинальном режиме работы дизеля турбина развивает эффективный крутящий момент $M_{\text{т}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При подводе дополнительной энергии к турбокомпрессору на его ротор действовал дополнительный крутящий момент $M_{\text{доп}}$. На рис. 5 приведено сравнение ПП без подвода (кривая 1) и с подводом дополнительной энергии к турбокомпрессору при $M_{\text{доп}} = 30, 50, 70$ и $100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (кривые 2–5).

При росте энергии, подводимой к ротору турбокомпрессора, уменьшается заброс частоты вращения. Однако при $M_{\text{доп}} > 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ происходит увеличение продолжительности ПП. Наилучший эффект по снижению заброса наблюдается при максимальном дополнительном моменте $M_{\text{доп}} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$, но при этом длительность ПП

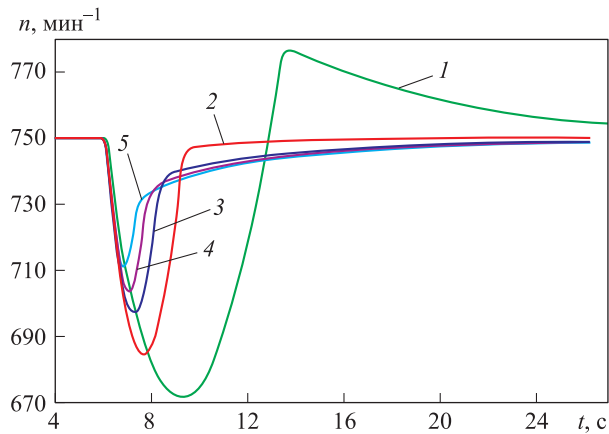


Рис. 5. ПП САР без подвода (1) и с подводом дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора при $M_{\text{доп}} = 30$ (2), 50 (3), 70 (4) и 100 Н·м (5)

регулирования также достигает максимального значения.

Методы интенсификации воздухообеспечения дизеля приводят к улучшению качества процессов регулирования и уменьшению отклонения частоты вращения от номинального значения. В результате РЧВ, реагирующий на отклонение частоты вращения, определяет цикловую подачу топлива иначе, чем для дизеля без системы приемистости. В связи с этим возникает необходимость корректирования определенных на первом этапе исследования коэффициентов ПИД-закона регулирования.

В результате подбора коэффициентов закона регулирования при подводе дополнительной энергии к турбокомпрессору определены следующие значения коэффициентов, при которых снижается длительность ПП регулирования: $k_{\text{д}} = 120$, $k_{\text{и}} = 40$, $k_{\text{д}} = 10$, $k = 0,32$. Соответствующий ПП приведен на рис. 6 (кривая 1). Здесь же для сравнения показан ПП при коэффициенте дифференциальной составляющей $k_{\text{д}} = 30$ (кривая 2). При повышении $k_{\text{д}}$ возникают заметные колебания частоты вращения на установившемся режиме. Чтобы их ликвидировать, необходимо фильтровать сигнал датчика частоты вращения. Максимальное отклонение частоты вращения уменьшилось до 42 min^{-1} , заброс частоты вращения — до $\delta = 5,6 \%$, а длительность ПП регулирования $\tau = 1,6 \text{ с}$ (по 1-му классу точности).

Подвод дополнительного воздуха во впускной трубопровод дизеля. Для исследования этого метода (рис. 7) выполнено моделирование подачи воздуха от постороннего источника (баллонов) под давлением $p_{\text{к,доп}} = 0,13$ (кривая 3

с синими точками), 0,15 (кривая 2 с красными точками) и 0,23 МПа (кривая 1 с черными точками). Полученные ПП САР свидетельствуют о нецелесообразности повышения давления дополнительного воздуха более $p_{\text{к,доп}} = 0,15$ МПа вследствие отсутствия заметного улучшения качества ПП. Использованы те же значения коэффициентов ПИД-закона регулирования, что и при подводе дополнительной энергии к турбокомпрессору. Достигнуты следующие показатели качества ПП: максимальное отклонение частоты вращения 20 min^{-1} , заброс частоты вращения $\delta = 2,7 \%$, длительность ПП регулирования $\tau = 4 \text{ с}$ (по 1-му классу точности).

Подвод дополнительного воздуха непосредственно в цилиндры. Исследование проведено при подаче воздуха в цилиндры на такте впуска

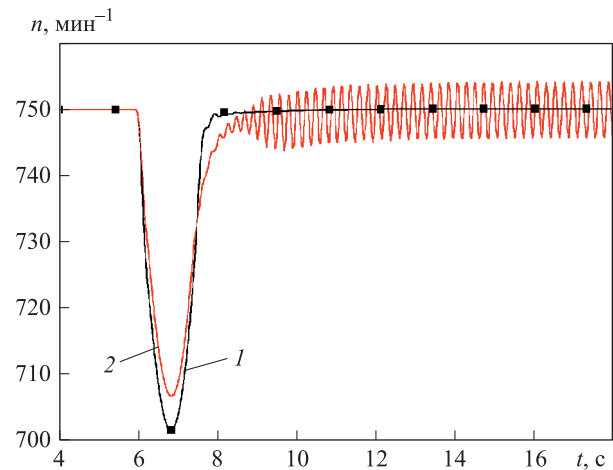


Рис. 6. ПП САР при подводе дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора с использованием системы приемистости: 1 — $k_{\text{д}} = 10$; 2 — $k_{\text{д}} = 30$

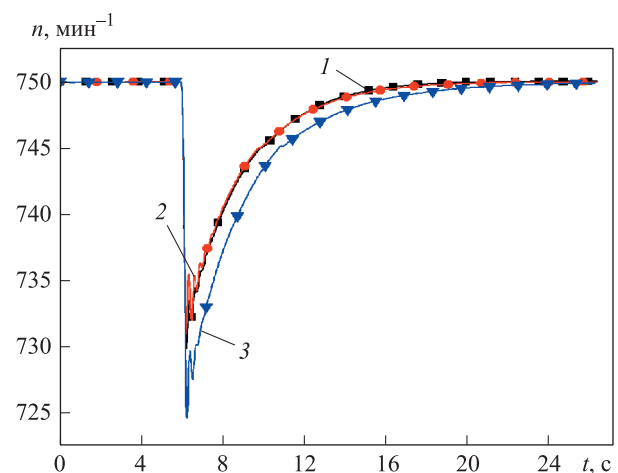


Рис. 7. ПП САР при подводе дополнительного воздуха во впускной трубопровод двигателя под давлением $p_{\text{к,доп}} = 0,23$ (1), 0,15 (2) и 0,13 МПа (3)

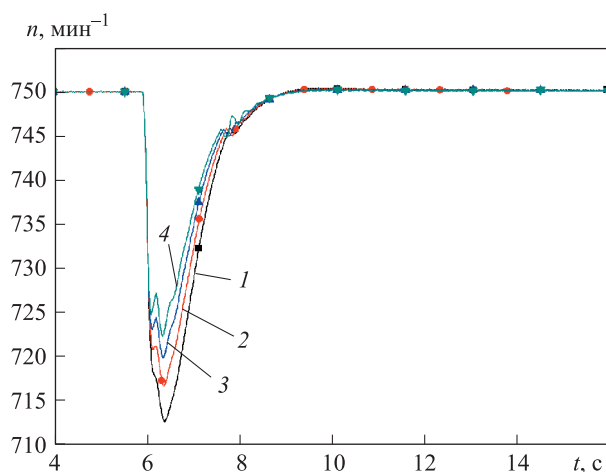


Рис. 8. ПП САР при подводе дополнительного воздуха непосредственно в цилиндры:
1 — $k = 0,14$; 2 — $k = 0,16$; 3 — $k = 0,18$; 4 — $k = 0,2$

от постороннего источника под давлением $p_{ц,доп} = 0,15$ МПа. В результате расчетов определены следующие скорректированные значения коэффициентов составляющих ПИД-закона регулирования: $k_n = 100$, $k_m = 120$, $k_d = 15$, $k = 0,18$. Влияние общего множителя закона регулирования на качество ПП САР при подводе дополнительного воздуха в цилиндры дизеля показано на рис. 8. Наилучшее качество ПП получено при $k = 0,18$. Показатели качества ПП при набросе нагрузки следующие: максимальное отклонение частоты вращения 30 мин^{-1} , заброс частоты вращения $\delta = 4 \%$, длительность ПП регулирования $\tau = 1,7$ с (по 1-му классу точности).

Литература

- [1] Кутенев В.Ф., Козлов А.В., Теренченко А.С., Шюте Ю.В. Проблемные вопросы ограничения выбросов CO_2 от автотранспортных средств. *Журнал автомобильных инженеров*, 2010, № 3, с. 55–59.
- [2] Haurie A., Sceia A., Thenie J. *Inland Transport and Climate Change a Literature Review*. University of Geneva, 2009. 18 p.
- [3] ГОСТ 10511–83. *Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования*. Москва, ИПК Издательство стандартов, 2004. 13 с.
- [4] Kadua C.B., Patilb C.Y. Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 79, pp. 737–746.
- [5] Grekhnyov A.V., Yusha V.L., Vanyashov A.D., Litunov C.H., Tretyakov A.V. The Definition Limits Technique for the Efficient Regulation of the «Diesel Engine — Pressurized Turbo-compressor» System for Mobile Compressor Units. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 113, pp. 152–157.
- [6] Шабалин Д.В., Терещенко Е.С., Фадеев Д.Ю. Метод повышения приемистости комбинированного дизеля. *Вестник СибАДИ*, 2014, № 3(37), с. 31–34.
- [7] AVL FIRE™. Available at: <https://www.avl.com/fire> (accessed 15 January 2018).

Выводы

1. Для обеспечения высоких требований к качеству ПП дизель-генераторов необходимо совершенствовать САР частоты вращения и применять систему приемистости, улучшающую воздухообеспечение двигателя. Расчетное исследование интенсификации ПП выполнено для дизель-генератора на базе широко применяемого дизеля Д49.

2. Для моделирования ПП САР рассматриваемого дизель-генератора разработана компьютерная программа в ПК GT-Power.

3. В результате подбора коэффициентов ПИД-закона регулирования определены их значения, обеспечивающие максимальное быстродействие РЧВ по увеличению подачи топлива при набросе нагрузки.

4. Проведено исследование методов улучшения воздухообеспечения дизеля системой приемистости путем подвода дополнительной энергии к ротору турбокомпрессора и дополнительного воздуха во впускной трубопровод двигателя и непосредственно в цилиндры.

5. Наилучший результат по улучшению качества ПП получен при подводе дополнительного воздуха во впускной трубопровод двигателя.

6. Разработанная компьютерная программа и результаты исследования могут быть использованы при выполнении работ по интенсификации ПП дизель-генераторов.

- [8] *Ricardo Software – WAVE – combustion and emissions*. Available at: <https://software.ricardo.com/products/wave/wave-combustion-and-emissions> (accessed 15 January 2018).
- [9] *Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК*. URL: <http://diesel-rk.bmstu.ru/Rus/index.php> (дата обращения 15 января 2018).
- [10] Дураев Н.Н., Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на переменной частоте вращения. *Известия Томского политехнического университета*, 2013, т. 322, № 4, с. 48–52.
- [11] Sapra H., Godjevac M., Visser K., Stapersma D., Dijkstra C. Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure. *Applied Energy*, 2017, vol. 204, pp. 78–92.
- [12] Wei C., Chen M., Jiang Y. Electronic Control Fuel Injection System Based on GT-POWER and Moto Tron. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 773–779.
- [13] Guo-dong Y., Chun-long X., Jun-feng X., Ming Z., Zeng-quan W. Application of Space-time Conservation Element and Solution Element Method in Intake and Exhaust Flows of High Power Density Diesel Engine. *Defence Technology*, 2013, vol. 9, is. 3, pp. 171–175.

References

- [1] Kutenev V.F., Kozlov A.V., Terenchenko A.S., Shiute Iu.V. Problemnye voprosy ogranicheniia vybrosov CO₂ ot avtotransportnykh sredstv [Problematic issues of limiting CO₂ emissions from motor vehicles]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [The journal of automotive engineers]. 2010, no. 3, pp. 55–59.
- [2] Haurie A., Sceia A., Thenie J. *Inland Transport and Climate Change a Literature Review*. University of Geneva, 2009. 18 p.
- [3] GOST 10511–83. *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia (SARCh) sudovykh, teplovoznnykh i promyshlennykh dizelei. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia* [State Standard 10511–83. Automatic rotational frequency control systems (ARFCS) of marine, locomotive and industrial diesel engines. General technical requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2004. 13 p.
- [4] Kadu C.B., Patil C.Y. Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 79, pp. 737–746.
- [5] Grekhnyov A.V., Yusha V.L., Vanyashov A.D., Litunov S.N., Tretyakov A.V. The Definition Limits Technique for the Efficient Regulation of the «Diesel Engine-Pressurized Turbo-compressor» System for Mobile Compressor Units. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 113, pp. 152–157.
- [6] Shabalin D.V., Tereshchenko E.S., Fadeev D.Iu. Metod povysheniia priemistosti kombinirovannogo dizelia [Method of increasing the injectivity of combined diesel engine]. *Vestnik SibADI* [Vestnik SibADI]. 2014, no. 3(37), pp. 31–34.
- [7] *AVL FIRE™*. Available at: <https://www.avl.com/fire> (accessed 15 January 2018).
- [8] *Ricardo Software – WAVE – combustion and emissions*. Available at: <https://software.ricardo.com/products/wave/wave-combustion-and-emissions> (accessed 15 January 2018).
- [9] *Programmnyi kompleks DIZEL'-RK* [DIESEL-RK is an engine simulation tool]. Available at: <http://diesel-rk.bmstu.ru/Rus/index.php> (accessed 15 January 2018).
- [10] Duraev N.N., Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Imitatsionnaia model' dizel'nogo dvigatel'ia dlia issledovaniia ego rabochikh kharakteristik na peremnoi chastote vrashcheniia [Simulation model of diesel engine to study its performance at variable speed]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2013, vol. 322, no. 4, pp. 48–52.
- [11] Sapra H., Godjevac M., Visser K., Stapersma D., Dijkstra C. Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure. *Applied Energy*, 2017, vol. 204, pp. 78–92.
- [12] Wei C., Chen M., Jiang Y. Electronic Control Fuel Injection System Based on GT-POWER and Moto Tron. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 174, pp. 773–779.

- [13] Guo-dong Y., Chun-long X., Jun-feng X., Ming Z., Zeng-quan W. Application of Space-time Conservation Element and Solution Element Method in Intake and Exhaust Flows of High Power Density Diesel Engine. *Defence Technology*, 2013, vol. 9, is. 3, pp. 171–175.

Статья поступила в редакцию 07.03.2018

Информация об авторах

КУЗНЕЦОВ Александр Гаврилович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

ХАРИТОНОВ Сергей Викторович (Москва) — ассистент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: devilfess@mail.ru).

ЛЮ Ин (Москва) — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 1548364742@qq.com).

Information about the authors

KUZNETSOV Aleksandr Gavrilovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Thermal Physics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

KHARITONOV Sergey Viktorovich (Moscow) — Teaching Assistant, Thermal Physics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: devilfess@mail.ru).

LIU Ying (Moscow) — Postgraduate, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 1548364742@qq.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Лю Ин. Исследование методов интенсификации переходных процессов дизель-генератора. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 6, с. 50–58, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-50-58.

Please cite this article in English as:

Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V., Ying Liu. A Study of Methods of Intensification of Transient Processes in a Diesel-Generator. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 6, pp. 50–58, doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-50-58.



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

вышло в свет учебное пособие

Э.Н. Самохвалова, Г.И. Ревункова, Ю.Е. Гапанюка

«Введение в проектирование и разработку приложений на языке программирования С#»

Представлены основы языка программирования С#. Рассмотрены среда исполнения .NET, конструкции языка С# и объектно-ориентированное программирование на нем, работа с коллекциями, файловой системой, рефлексией, а также параллельная обработка данных. Дано введение в технологию разработки оконных пользовательских интерфейсов Windows Forms.

Для студентов, изучающих информатику и вычислительную технику в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru