

УДК 621.431

**Д.С. МИНЧЕВ, Ю.Л. МОШЕНЦЕВ, А.В. НАГОРНЫЙ<sup>1</sup>, А.С. ДЬЯКОНОВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев*<sup>2</sup> *ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», г. Николаев*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБОКОМПРЕССОРА ПРИ РАСЧЕТЕ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Рассмотрены особенности интеграции экстраполированных и интерполированных характеристик турбокомпрессора в математическую модель рабочего цикла комбинированного дизельного двигателя для расчета неустановившихся режимов работы. Показано, что корректное моделирование переходных процессов в системе наддува невозможно без адекватного определения параметров компрессора и турбины турбокомпрессора в тех диапазонах режимах их работы, которые, как правило, не описываются экспериментальными данными. Эффективность предлагаемого подхода оценивается путем сравнения расчетных и экспериментальных данных для режимов разгона дизельного двигателя типа 8ЧН 12/12.*

**Ключевые слова:** динамическая характеристика, характеристики турбокомпрессора, газотурбинный наддув, переходной процесс.

### Постановка проблемы

При проектировании системы наддува современных дизельных двигателей транспортного назначения остро стоит проблема рационального согласования характеристик лопаточных машин турбокомпрессора (турбокомпрессоров) с поршневой частью двигателя. При давлении наддувочного воздуха, достигающего  $p_s = 33,5$  бар, коэффициент относительного диапазона работы центробежных компрессоров по расходу воздуха снижается до  $\kappa = 0,30,4$ , что вынуждает производителей применять сложные системы управляемого двухступенчатого либо управляемого регистрового (параллельного) газотурбинного наддува.

На неустановившихся режимах работы, из которых для транспортных двигателей важнейшими являются режимы разгона транспортного средства и режимы сброса нагрузки, эффективное согласование характеристик турбокомпрессора усложняется. Из-за инерционности ротора турбокомпрессора и вследствие переходных процессов в воздушном ресивере и выпускных коллекторах при работе двигателя на данных режимах наблюдается резкое расхождение статических и динамических характеристик двигателя. Так, при разгоне транспортного средства в начальной фазе наблюдается запаздывание роста давления наддувочного воздуха по отношению к частоте вращения коленчатого вала двигателя, так называемая «турбояма». В

результате резко снижается коэффициент избытка воздуха, что приводит к росту температур деталей цилиндро-поршневой группы и газов на входе в турбину, увеличению дымности выхлопа и выбросов токсических веществ. На современных двигателях электроника ограничивает подачу топлива на данных режимах, что неизбежно приводит к снижению крутящего момента, развиваемого двигателем. По мере дальнейшего роста частоты вращения ротора турбокомпрессора давление наддува увеличивается, обуславливая скачкообразное возрастание мощности двигателя, «турбоподхват», что неблагоприятно с точки зрения удобства управления транспортным средством.

При резком сбросе нагрузки наблюдается быстрое возрастание давления наддувочного воздуха в воздушном ресивере, что может привести к превышению допустимого значения максимального давления сгорания  $p_z$  в цилиндре двигателя и возникновению явлений помпажа.

### Обзор публикаций

Можно выделить два принципиальных подхода к моделированию неустановившихся режимов работы двигателей внутреннего сгорания. В соответствии с первым подходом, широко используемом в теории автоматического регулирования ДВС, составляется система линейаризованных дифференциальных уравнений двигателя как объекта регулирования, с после-

дующим решением этой системы [1]. При этом удается существенно сократить время расчета переходного процесса, однако, в результате могут быть получены лишь весьма ограниченные сведения об изменении параметров рабочего процесса двигателя. Рассматриваемый метод применяется для разработки автоматических регуляторов (частоты вращения, нагрузки, давления наддува, температур охлаждающих теплоносителей и т.д.).

Второй подход базируется на полном комплексном расчете последовательности рабочих циклов в цилиндре двигателя и элементах системы наддува [5, 9, 10]. При этом в качестве базы используются математические модели рабочего цикла, основанные на численном интегрировании систем дифференциальных уравнений, описывающих состояние рабочего тела для нульмерного, одномерного или трехмерного подходов. К несомненным достоинствам второго подхода следует отнести возможность корректного учета влияния изменения различных регулировочных и конструктивных параметров двигателя и его систем, включая характеристики топливоподачи, фазы газораспределения, рециркуляцию отходящих газов, особенности регулирования агрегатов системы наддува и, наконец, особенности характеристик агрегатов системы наддува. Недостаток заключается в том, что первоначальная настройка таких моделей требует наличия существенно большего объема экспериментальных данных.

При исследовании особенностей работы системы наддува на неустановившихся режимах особое внимание необходимо уделить характеристикам компрессора и турбины турбокомпрессора и их интеграции в расчетную модель. В работах [6, 7] предложены методики расчетного определения характеристик компрессоров и турбин малоразмерных турбокомпрессоров по геометрическим параметрам их проточных частей. При отсутствии подробных данных по геометрии компрессора и турбины использование данных методик затруднительно. В этом случае возможно осуществлять экстраполяцию и интерполяцию экспериментальных характеристик на основе подходов, изложенных в [3, 4].

### Цель работы

Оценка применимости предлагаемых способов экстраполяции и интерполяции характеристик лопаточных машин турбокомпрессора для расчета динамических характеристик дизельных двигателей.

### Изложение основного материала

Расчет неустановившихся режимов работы двигателя осуществляется путем соответствующей доработки комплексной математической модели стационарного режима работы комбинированного дизельного двигателя с системой

свободного газотурбинного наддува, разработанной на кафедре ДВСНУК [2]. Особенностью данного программного комплекса является возможность использования характеристик компрессора и турбины турбокомпрессора (турбокомпрессоров), в виде предварительно подготовленных подключаемых файлов.

Характеристики компрессора и турбины, используемые при расчетах, получаются на основании экспериментальных данных путем их обработки в соответствии с методиками, изложенными в [3, 4]. В результате обработки осуществляется экстраполяция и интерполяция экспериментальных характеристик компрессора и турбины. В результате экстраполяции характеристики компрессора расширяются в область низких  $P_k$  (вплоть до  $P_k < 1$  при заторможенном роторе турбокомпрессора) и до границы запираания компрессора. Характеристики турбины также экстраполируются в зону низких  $P_t$  (вплоть до  $P_t = 1$ ) и до границы запираания. Отметим, что таким образом экстраполируется каждая изотеха характеристики турбины и компрессора.

При расчете стационарных режимов экстраполяция характеристик турбокомпрессора необходима для обеспечения устойчивости итерационного процесса и при расчете режимов работы двигателя при низкой нагрузке. Для адекватного расчета динамических характеристик двигателя, как будет показано ниже, получение расширенных характеристик турбокомпрессора особенно критично, так как компрессор и турбина в ходе переходного процесса работают на режимах, существенно отличающихся от стационарных.

На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема математической модели. Первоначально рассчитывается стационарный режим работы двигателя до начала переходного процесса. Данный шаг необходим для определения начальных условий расчета – массивов параметров рабочего тела в цилиндре двигателя, впускном ресивере и выпускных коллекторах. Далее рассчитывается последовательность рабочих циклов двигателя.

На каждом внутреннем расчетном шаге осуществляется интерполяция расходной характеристики компрессора (РХК) для определения мгновенного расхода воздуха через компрессор  $dm_{\text{рес}}^0$ , поступающего в воздушный ресивер, интерполяция характеристики эффективности компрессора (ХЭК) для определения температуры воздуха за компрессором. Также осуществляется интерполяция расходной характеристики турбины (РХТ) для определения мгновенного расхода отходящих газов через колесо турбины  $dm_t^0$ , и характеристика эффективности турбины (ХЭТ) для определения мгновенно значения эффективного КПД турбины.

Полученные массивы мгновенных значений параметров лопаточных машин турбокомпрессоров после окончания рабочего цикла двигателя используются для определения мощности турбины и компрессора на каждом внешнем шаге расчета, соответствующем времени рабочего цикла.

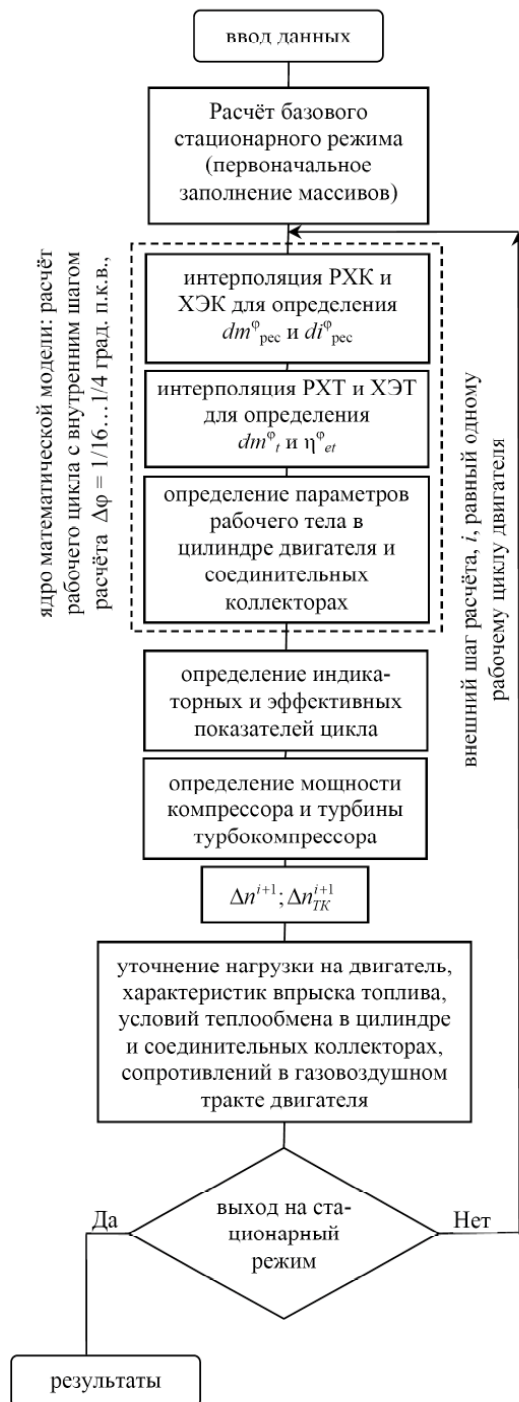


Рис.1. Принципиальная блок-схема математической модели неустановившихся режимов работы комбинированного двигателя с газотурбинным наддувом

Для определения приращения частоты вращения двигателя и турбокомпрессора используются соответствующие уравнения динамики, а также уравнение для определения нагрузки на двигатель:

$$\Delta n^{i+1} = \frac{60}{I_{дв}} \frac{N_e^i - N_{тр}^i - N_{нагр}^i}{\chi \left( \frac{\pi}{30} n^i \right)^2};$$

$$\Delta n_{TK}^{i+1} = \frac{60}{I_{TK}} \frac{N_t^i - N_k^i}{\chi \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 n^i n_{TK}^i};$$

$$N_{нагр}^i = A_0 + A_1 \left( \frac{n^i}{n_H} \right) + A_2 \left( \frac{n^i}{n_H} \right)^m,$$

где  $n$  – мгновенная частота вращения двигателя;  $n_{TK}$  – мгновенная частота вращения ротора турбокомпрессора;  $N_e$  – мгновенное значение эффективной мощности двигателя, представляющей собой разницу между индикаторной мощностью и мощностью механических потерь;  $N_{нагр}$  – мгновенное значение мощности потребителя нагрузки;  $N_t$  – мгновенное значение мощности турбины турбокомпрессора;  $N_k$  – мгновенное значение мощности компрессора турбокомпрессора;  $N_{тр}$  – мгновенное значение потерь мощности в трансмиссии;  $I_{дв}$  – суммарный приведенный момент инерции движущихся частей двигателя, трансмиссии и движителя транспортного средства;  $A_0, A_1, A_2$  – постоянные коэффициенты;  $I_{TK}$  – момент инерции ротора турбокомпрессора;  $n_H$  – номинальная частота вращения двигателя;  $i$  – номер внешнего шага расчета;  $\chi$  – коэффициент тактности.

Кроме указанных уравнений для каждого внешнего шага расчета уточняются значения углов опережения и продолжительности впрыска топлива, сопротивления охладителя наддувочного воздуха, выхлопной системы, эффективности охладителя наддувочного воздуха.

Для проверки адекватности математической модели была проведена ее настройка на экспериментальные данные, полученные в результате испытаний в лаборатории кафедры двигателей внутреннего сгорания НУК дизельного двигателя КамАЗ-740 (8ЧН 12/12), оборудованного опытной системой наддува с использованием турбокомпрессора ТКР-11В. Экспериментальная установка оборудована средствами измерения, позволяющими в реальном времени осуществлять запись следующих параметров рабочего цикла (после соответствующей обработки сигналов первичных преобразователей): частоты вращения двигателя и турбокомпрессора, давлений в воздушном

ресивере и выпускном коллекторе, мгновенного расхода воздуха через компрессор, индикаторного давления в цилиндре двигателя, крутящего момента сопротивления нагрузки, давления топлива перед форсункой. Указанные данные записываются на жесткий диск персонального компьютера посредством 8-канального аналого-цифрового преобразователя.

Двигатель первоначально выводился на стационарный режим  $N_e = 19,9$  кВт при  $800 \text{ мин}^{-1}$ . При этом давление наддувочного воздуха составляло  $p_s = 109$  кПа. Затем осуществлялось резкое перемещение рычага регулятора ТНВД в положение, соответствующее  $1950 \text{ мин}^{-1}$ . Тиристорный привод, управляющий возбуждением генератора при неизменном положении регулирующего

потенциометра, обеспечивает следующий закон изменения мощности нагрузки:

$$N_{\text{нагр}}^i = 167,4 \cdot \left( \frac{n^i}{2600} \right)^{1,79}, \text{ кВт.}$$

По окончании переходного процесса двигатель выходил на стационарный режим:  $N_e = 99,8$  кВт при  $1950 \text{ мин}^{-1}$ ,  $p_s = 168$  кПа.

На рис. 2 показаны экстраполированные характеристики компрессора и турбины турбокомпрессора ТКР-11В, установленного на двигатель, совмещенные с экспериментальным и расчетным переходным процессом.

На рис. 3 сопоставлены результаты математического моделирования с экспериментальной динамической скоростной характеристикой.

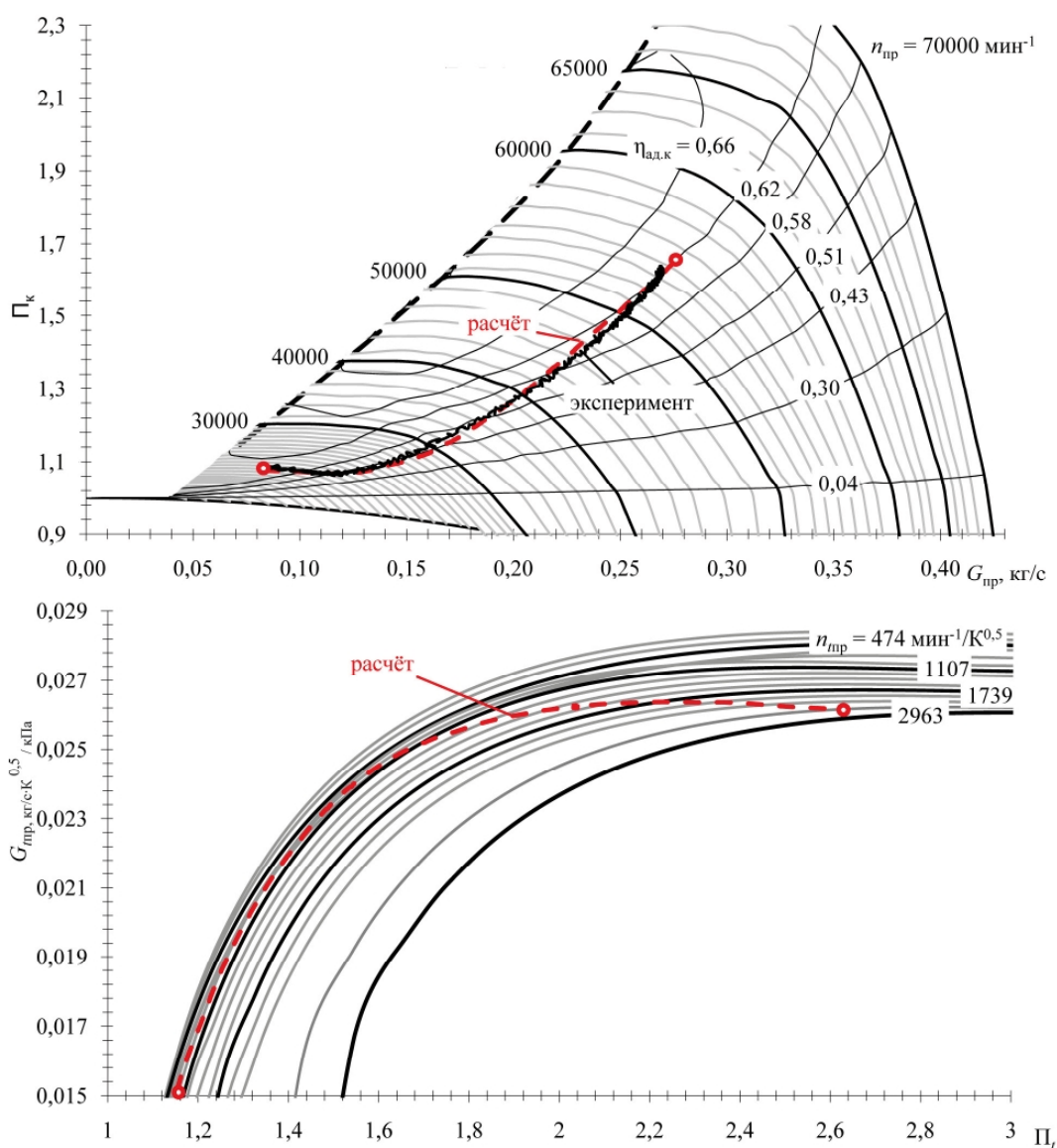


Рис. 2. Расчетная динамическая скоростная характеристика дизельного двигателя типа 8ЧН 12/12 на экстраполированных и интерполированных характеристиках компрессора и турбины турбокомпрессора типа ТКР-11В.

Как видно, математическое моделирование обеспечивает удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Наибольшее отклонение наблюдается для зависимости частоты вращения турбокомпрессора и давления наддувочного воздуха, что может быть устранено соответствующей доработкой карт характеристик компрессора. Следует отметить, что практически весь переходный процесс на характеристиках компрессора и турбины лежит вне зоны режимов работы, описываемых исходными экспериментальными характеристиками [8], которые были дополнительно идентифицированы по результатам испытаний двигателя на статических режимах.

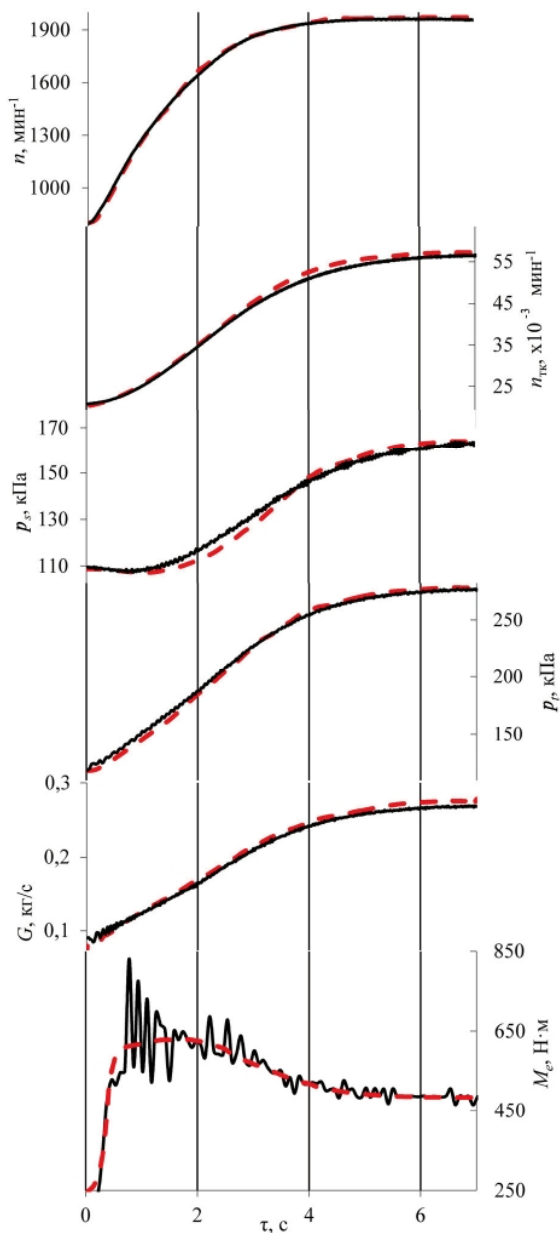


Рис.3. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования:  
 — эксперимент; - - - расчет

## Выводы

В программу расчета динамических характеристик дизельных двигателей с газотурбинным наддувом, разработанную в НУК, интегрированы специальным образом экстраполированные и интерполированные характеристики компрессора и турбины турбокомпрессора. Предлагаемые характеристики обеспечивают уточненное описание параметров лопаточных машин при низких давлениях рабочих тел и при их работе вблизи границы запираания. Использование данных характеристик обеспечивает возможность определения мгновенных расходов газа через лопаточные машины и мгновенное значение эффективностей компрессора и турбины на каждом внутреннем шаге расчета по углу поворота коленчатого вала двигателя в течение каждого рабочего цикла, входящего в переходный процесс. Дальнейшие работы в данном направлении могут быть связаны с использованием данной модели для исследования современных и перспективных систем управляемого двухступенчатого наддува.

## Литература

1. Крутов В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.И.Крутов. — М.: Машиностроение, 1979. — 615 с.
2. Минчев Д.С. Повышение эффективности дизельных бесшатунных двигателей путем совершенствования схем и параметров системы наддува: дисс. к.т.н. [Текст] / Д.С. Минчев. — Николаев, НУК, 2011. — 243 с.
3. Минчев Д.С. Экстраполяция экспериментальных характеристик радиальных центробежных турбин турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Д.С. Минчев, Ю.Л. Мошенцев, А.В. Нагорный // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.: Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — №10 (87). — Х., 2011. — С. 173-177.
4. Минчев Д. С. Экстраполяция экспериментальных характеристик центробежных компрессоров [Текст] / Д. С. Минчев, Ю.Л. Мошенцев, А.В. Нагорный // Сборник научных трудов Национального университета кораблестроения. — №4. — Николаев, 2011. — С. 89-98.
5. Крушедольский О. Г. Моделирование рабочих процессов транспортных дизелей на эксплуатационных режимах [Текст] / О.Г. Крушедольский — Х.: УкрДАЗДТ, 2007. — 217 с.
6. Петросянц В. А. Повышение топливной экономичности быстроходных дизелей с

наддувом путем выбора рациональных конструктивных параметров турбин: Автореф. диссканд.техн.наук.— Харьков: ХИИТ, 1983. — 24 с.  
7. Коньков А.Ю. Исследование и оптимизация малоразмерных компрессоров агрегатов наддува быстроходных дизелей : Автореф. диссканд.техн.наук.— Харьков: ХИИТ, 1993. — 22 с.  
8. Турбокомпрессоры для наддува дизелей : справочное пособие [текст] / Б.П. Байков,

В. Г. Бордуков, П. В. Иванов, Р. С. Дейч. — Л.: «Машиностроение», 1975. — 200 с.  
9. Hiereth H. Charging the Internal Combustion Engine / H. Hiereth, P. Preninger. — Wien.: SpringerWienNewYork, 2007. — 268 p.  
10. Winkler, N. Simulations and Measurements of a Two-Stage Turbocharged Heavy-Duty Diesel Engine Including EGR in Transient Operation [Text] / N. Winkler, H.-E. Angstrom // SAE Technical Paper Series. — 2008. — №2008-01-0539.

Поступила в редакцию 01.06.2013

**Д.С. Мінчев, Ю.Л. Мошенцев, А.В. Нагірний, О.С. Дьяконов. Використання характеристик турбокомпресора для розрахунку неусталених режимів роботи дизельних двигунів**

*Розглянуті особливості інтеграції екстрапольованих характеристик турбокомпресора в математичну модель робочого циклу комбінованого дизельного двигуна для розрахунку неусталених режимів роботи. Показано, що коректне моделювання перехідних процесів в системі наддуву неможливе без адекватного визначення параметрів компресора і турбіни турбокомпресора в тих діапазонах режимів їх роботи, що, як правило, не описані експериментальними даними. Ефективність запропонованого методу оцінюється шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних для режимів розгону дизельного двигуна типу 8ЧН 12/12 (КамАЗ-740.10).*

**Ключові слова:** динамічна характеристика, характеристики турбокомпресора, газотурбінний наддув, перехідний процес.

**D. S. Minchev, U. L. Moshentsev, A. V. Nagirnyi, O. S. Dyakonov. Simulation of diesel engine transient performance using turbocharger maps**

*The turbocharger extrapolated maps using for transient performance simulation of turbocharged diesel engines with focus on the supercharging system is presented. The appropriate simulation of the transient processes into the supercharging system is impossible without adequate definition of the turbine and compressor performance for the whole range of their operation as it is shown. The accuracy of the suggested approach is estimated by comparison of simulated and measured data for acceleration of diesel engine 8ЧН 12/12 (КамАЗ-740.10).*

**Key words:** transient performance, turbochargers maps, turbocharging system, engine cycle simulation.