



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2014.5.8>

УДК 621.436

ББК 31.27

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ С ДИЗЕЛЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

**Иващенко Николай Антонович**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Э-2,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
[ivaschen@mail.ru](mailto:ivaschen@mail.ru)  
ул. 2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Кузнецов Александр Гаврилович**

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
[kuzag441@mail.ru](mailto:kuzag441@mail.ru)  
ул. 2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Харитонов Сергей Викторович**

Аспирант кафедры «Теплофизика»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
[devilfess@mail.ru](mailto:devilfess@mail.ru)  
ул. 2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Кузнецов Сергей Александрович**

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
[kuznetsovsergey@inbox.ru](mailto:kuznetsovsergey@inbox.ru)  
ул. 2-я Бауманская, 5, 105005 г. Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В данной работе рассматривается транспортное средство с дизелем как источником энергии и электрической передачей, включающей генератор и тяговые электродвигатели привода колес. Поставлена задача разработки способа управления транспортным средством, обеспечивающего работу дизеля на режимах с наилучшей экономичностью.

Приведенные результаты моделирования вариантов управления энергетической установкой позволяют обоснованно подойти к формированию алгоритмов управления транспортным средством, обеспечивающих оптимизацию работы дизеля по критерию экономичности.

**Ключевые слова:** дизель, электрическая трансмиссия, процессы управления, экономичность дизеля, моделирование.

В энергетических установках современных транспортных средств тепловой двигатель нередко сочетается с электрической трансмиссией [3, 8, 9]. Одним из достоинств таких транспортных средств является возможность использования гибкого управления, при котором возможна оптимизация функционирования транспортного средства по выбранным критериям. Для энергетической установки наиболее важными являются критерии, основанные на экономических и экологических показателях. Для транспортного средства в целом интерес представляют такие критерии, как динамичность движения и удобство управления.

В данной работе рассмотрено транспортное средство автомобильного типа, источником энергии в котором является дизель Liebherr V8 номинальной мощностью 505 кВт. Энергетическая установка включает в себя также трансмиссию электрического типа, в которой дизель приводит в действие тяговый генератор. Напряжение, создаваемое тяговым генератором, через преобразователь подается на тяговые электродвигатели, которые через редукторы связаны с колесами транспортного средства. В качестве тяговых генератора и электродвигателей используются электрические машины вентильно-индукторного типа.

Для расчетного анализа функционирования рассматриваемого транспортного средства при различных способах управления необходима математическая модель, описывающая переходные процессы изменения во времени основных параметров транспортного средства при управлении автомобилем и изменении условий его движения.

Анализ информационных источников показывает, что вопрос разработки подобных моделей в настоящее время еще недостаточно проработан как для тепловых двигателей, так и для электрических машин. Основные проблемы заключаются в необходимости расчета не только установившихся, но и неустановившихся режимов работы, а также в разумной степени детализации описания процессов изменения параметров, характеризующих рабочие процессы в агрегатах транспортного средства.

В данной работе составлена математическая модель рассматриваемого транс-

портного средства, включающая модели дизеля, тяговых электрических машин и автомобиля.

Дизель с турбонаддувом представлен в виде совокупности четырех основных элементов: поршневой части, турбокомпрессора, впускного и выпускного трубопроводов. Динамические свойства перечисленных элементов дизеля описываются следующими дифференциальными уравнениями динамического баланса механических энергий и потоков массы газа.

Динамический баланс механических энергий для вала дизеля и ротора турбокомпрессора описывается уравнением вращения твердого тела

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I}(M_1 - M_2),$$

где  $\omega$  – угловая скорость вала дизель-генератора или ротора турбокомпрессора,  $I$  – момент инерции вала дизель-генератора или ротора турбокомпрессора,  $M_1$  – индикаторный момент дизеля или момент турбины,  $M_2$  – суммарный момент внутренних потерь в дизеле и тягового генератора или момент компрессора.

Уравнение изменения давления воздуха или газов  $p$  во впускном и выпускном трубопроводах

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V}(G_1 - G_2),$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха или газов,  $T$  – температура воздуха или газов,  $V$  – объем впускного или выпускного трубопровода,  $G_1$  – расход воздуха через компрессор или суммарный расход воздуха и топлива через двигатель,  $G_2$  – расход воздуха через двигатель или газов через турбину.

В связи со сложностью процессов, протекающих в дизеле с турбонаддувом, для его описания не достаточно использовать линейные дифференциальные уравнения и передаточные функции. Необходимо привлечение программных комплексов по расчету рабочих процессов двигателей и представление связей между параметрами рабочего процесса в виде функциональных зависимостей. При составлении модели рассматриваемого дизеля использованы подхо-

ды и методики, подробно изложенные в [1 – 5]. Получение исходных данных для составления модели дизеля осуществлялось с использованием программного комплекса «ДИЗЕЛЬ РК» [2, 6].

В моделях электрических машин для описания инерционных свойств обмоток использовались апериодические звенья первого порядка с учетом ограничений на характеристики электрических параметров. Механическая инерционность ротора генератора была включена в общий момент инерции дизель-генератора.

Транспортное средство рассматривалось как колесная установка заданной массы с приложенным к колесам моментом сопротивления. Инерционность транспортного средства учитывалась в приведенном моменте инерции валов тяговых электродвигателей.

Определение числовых значений постоянных времени различных частей транспортной установки показало, что электрическая инерционность обмоток электрических машин примерно на два порядка меньше механической инерционности их роторов, поэтому учет электрической инерционности обмоток слабо влияет на результаты расчета переходных процессов. Механическая инерционность тепловых и электрических машин энергетической установки гораздо меньше инерционности самого транспортного средства. Однако механическую инерционность элементов энергетической установки в расчетах необходимо учитывать, так как она определяет процессы преобразования и передачи энергии в силовом агрегате, что оказывает существенное влияние на функционирование транспортного средства в целом.

Программная реализация разработанных моделей осуществлена в программном комплексе Matlab/Simulink.

На данной стадии проектирования транспортного средства проведена верификация моделей дизеля и тягового генератора по результатам испытаний дизель-генератора в стендовых условиях при нагрузке генератора на реостаты. Некоторые результаты верификации приведены на рисунках 1 и 2. Здесь представлены переходные процессы изменения во времени частоты вращения вала дизель-генератора  $n_d$  и момента дизеля

М при изменении уставки частоты вращения вала дизеля. На рисунке 1 осуществлялось ступенчатое изменение уставки от  $n_d = 1000 \text{ мин}^{-1}$  до  $n_d = 1500 \text{ мин}^{-1}$ , на рисунке 2 – от  $n_d = 1900 \text{ мин}^{-1}$  до  $n_d = 600 \text{ мин}^{-1}$ . Сплошными линиями показаны расчетные переходные процессы, точками – экспериментальные данные.

Сравнение расчетных процессов с экспериментальными данными подтвердило работоспособность разработанных математических моделей и соответствующих программных средств, которые были использованы для моделирования процессов управления транспортным средством.

При моделировании проведен анализ возможности использования различных способов управления транспортным средством с точки зрения реализации работы дизеля по характеристике минимального расхода топлива.

На рисунке 3 в координатах «частота вращения  $n_d$  – эффективная мощность  $N$ » представлено поле характеристик дизеля с линией 1 минимальных значений удельного эффективного расхода топлива  $g_{emin}$ , полученной с использованием значений удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  для различных режимов работы дизеля. По линии 1 на рисунке 3 для каждой мощности дизеля  $N$  определяются значения частоты вращения  $n_d$ , на которой должен работать дизель из условия наилучшей топливной экономичности. Так, например, при мощности  $N = 400 \text{ кВт}$  частота вращения вала дизеля должна составлять  $n_d = 1400 \text{ мин}^{-1}$ .

Для трансмиссии комбинированного типа наиболее целесообразно рассматривать положение педали водителя либо как заданное желаемой мощности энергетической установки, либо как желаемую скорость транспортного средства. При этом сигнал от педали управления транспортным средством может поступать в регуляторы отдельных элементов энергетической установки: дизеля, тягового генератора, тяговых электродвигателей. Регулятор дизеля определяет цикловую подачу топлива  $g_d$ . В качестве регулятора дизеля использован пропорционально-интегральный регулятор частоты вращения. Рассматривался вариант системы управления, при котором регулятор тягового генера-

тора обеспечивает стабилизацию напряжения генератора. Регуляторы тяговых электродвигателей формируют ток в обмотках электродвигателей.

Задача обеспечения функционирования энергетической установки с наилучшей топливной экономичностью реализуется системой управления. Для работы дизеля по линии минимальных расходов топлива (линия 1 на рисунке 3) регулятор дизеля должен устанавливать соответствующую частоту вращения вала дизеля при различных значениях вырабатываемой мощности.

Гибкая связь между отдельными элементами энергетической установки предо-

ставляет возможность работы дизеля и тяговых электродвигателей только по балансу мощности без жесткой связи по крутящим моментам и частотам вращения валов агрегатов.

В системе управления тяговыми электродвигателями сигнал управления задает либо желаемую частоту вращения валов тяговых электродвигателей (то есть скорость транспортного средства), либо параметры и форму тяговой характеристики. Тяговая характеристика электродвигателей должна иметь убывающий по частоте вращения их валов характер, чтобы обеспечить устойчивость режимов движения транспортного

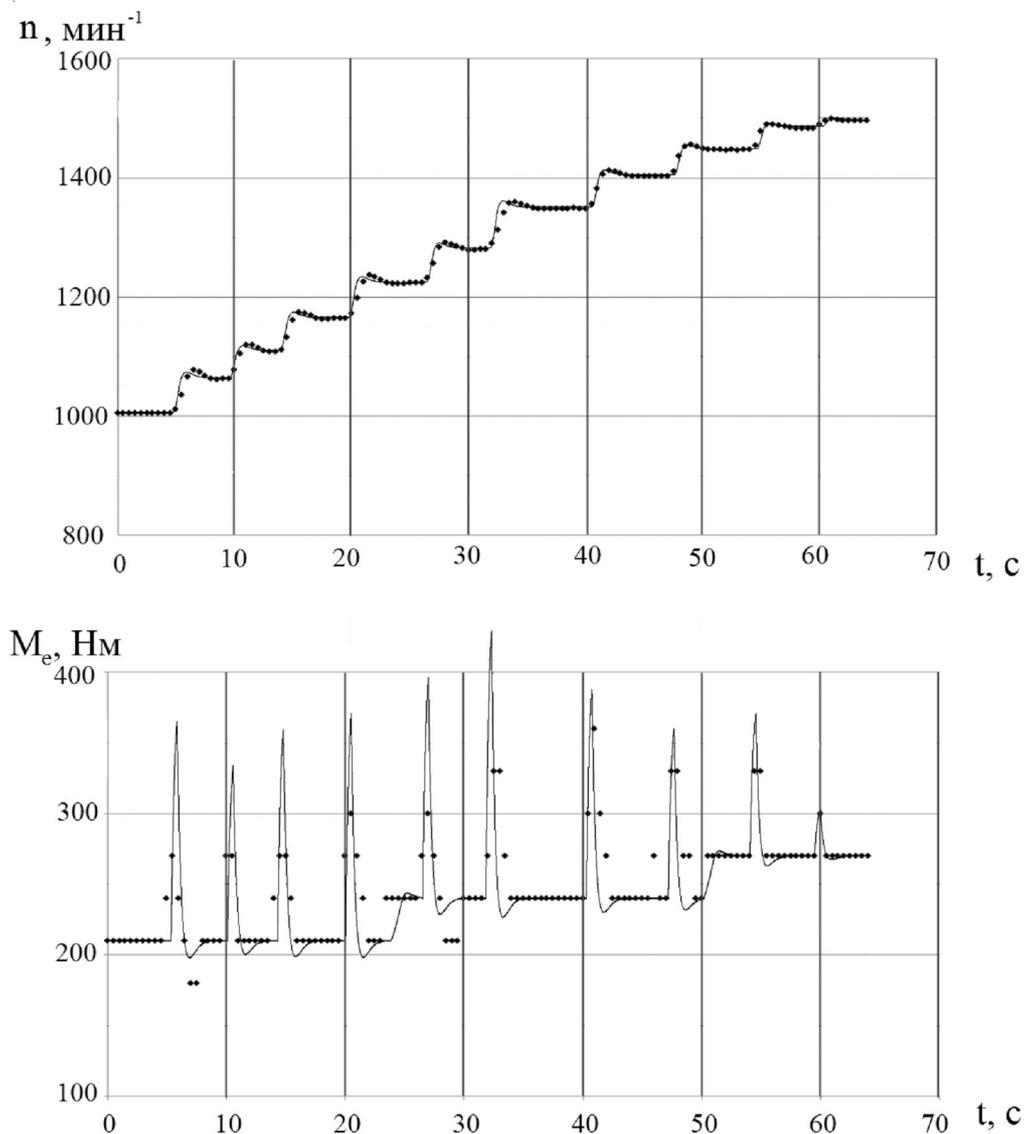


Рис. 1. Результаты верификации модели дизель-генератора

средства. Если исходить из условия постоянной мощности, зависимость момента от частоты вращения на тяговых электродвигателях должна иметь вид гиперболы, которая смещается в поле скоростных режимов двигателя в зависимости от управляющего сигнала педали водителя. Гиперболы ограничены из условий максимально возможных значений напряжения и тока в цепи электродвигателей.

В результате моделирования процессов управления транспортным средством и его движения при изменении момента сопротив-

ления на колесах выявлены особенности функционирования агрегатов его энергетической установки. В частности было установлено, что при резком воздействии водителя на педаль управления дизель может заглохнуть, поэтому при моделировании темп воздействия на педаль управления выбирался из условия обеспечения дизелем мощности, которая требуется генератору. При увеличении темпа воздействия на педаль управления возникает опасность заглохания дизеля.

На рисунках 4 и 5 приведены некоторые результаты моделирования переходных процес-

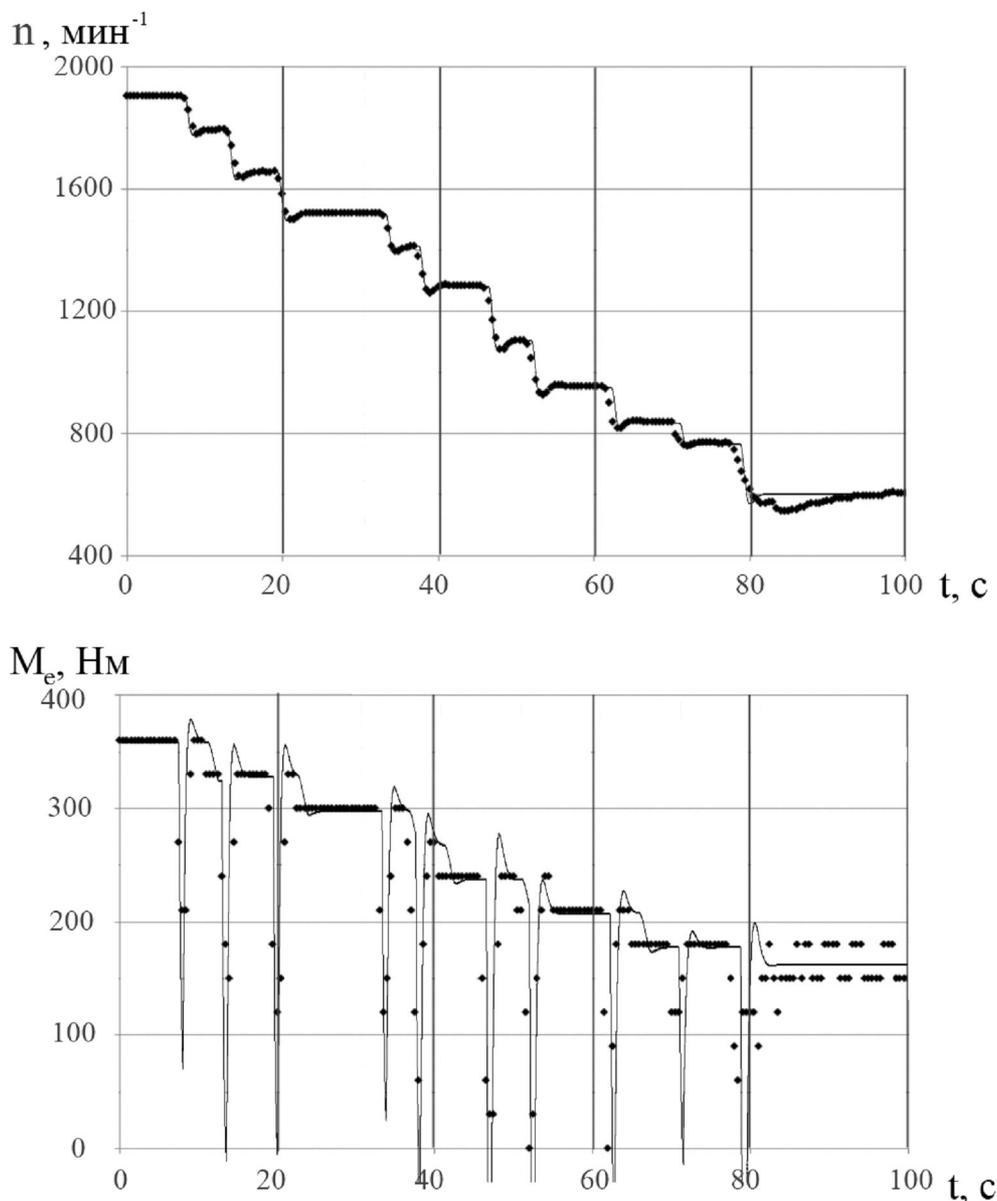


Рис. 2. Результаты верификации модели дизель-генератора

сов дизеля и движения транспортного средства для выбранных вариантов управления. На рисунках показано изменение во времени следующих параметров: положения педали управления (пунктирная линия на верхнем поле рисунка), момента сопротивления движению транспортного средства (сплошная линия на верхнем поле рисунка), частоты вращения вала дизеля, скорости движения транспортного средства, массы израсходованного топлива.

Рисунок 4 соответствует варианту управления, при котором педаль водителя воздействует на тяговые электродвигатели, задавая их мощность пропорционально положению педали, и на регулятор частоты вращения вала дизеля, задавая настройку частоты вращения в соответствии с требуемой мощностью по характеристике минимальных расходов топлива (линия 1 на рисунке 3). Рассматривались изменения положения педали водителя от 0 до 0,5 и далее до 1 (в относительных величинах) при одновременном изменении момента сопротивления движению на колесах транспортного средства от 500 Нм до 1000 Нм

На рисунке 5 приведены результаты моделирования, когда педаль управления за-

дает желаемую частоту вращения валов тяговых электродвигателей (то есть скорость транспортного средства) и настройку частоты вращения вала дизеля в соответствии с требуемой мощностью по характеристике минимальных расходов топлива. Положение педали водителя изменяется от 0 до 1 (в относительных величинах), что соответствует разгону транспортного средства до скорости 45 км/час. Момент сопротивления движению транспортного средства составляет 1000 Нм.

Из графиков переходных процессов, приведенных на рисунках 4 и 5 видно, что способ управления транспортным средством влияет на показатели его работы. Изменяется динамика разгона автомобиля, показатель экономичности и другие характеристики. Так, масса топлива, затраченного на достижения одинаковой скорости за одинаковое время при первом варианте управления составляет 1,1 кг, при втором варианте управления – 1,45 кг.

Следует отметить, что итоговая экономичность энергетической установки транспортного средства зависит не только от режима работы дизеля, но и от режимов работы эле-

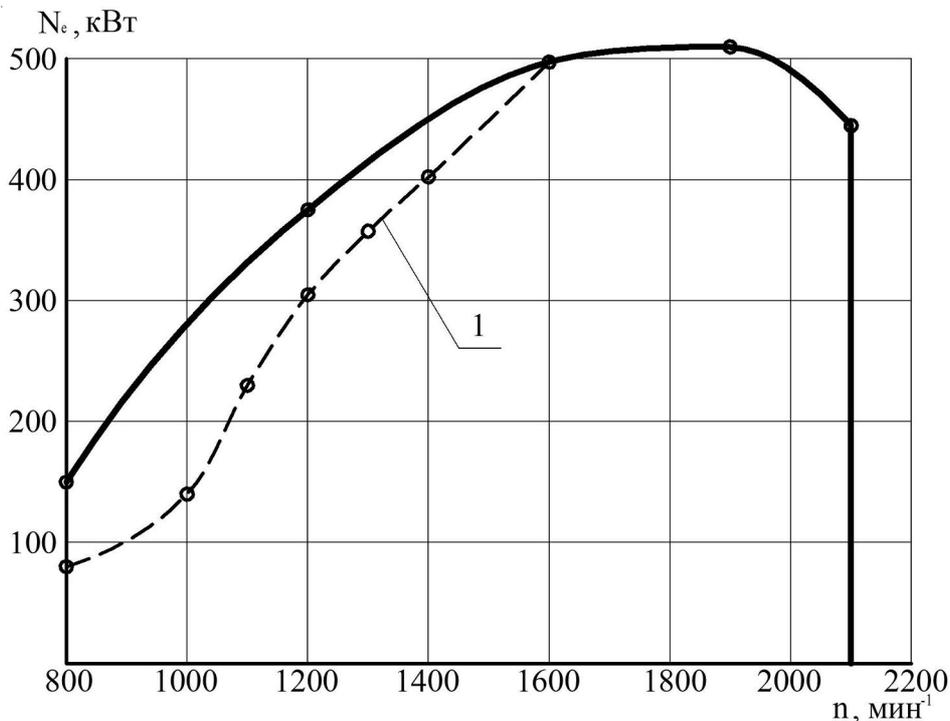


Рис. 3. Поле характеристик дизеля

ментов трансмиссии. Таким образом, желательно учитывать не только характеристики экономичности дизеля, но и характеристики коэффициентов полезного действия тягового генератора и тяговых электродвигателей. Однако на данном этапе разработки транспортного средства подробные характеристики электрических машин трансмиссии неизвестны, по-

этому анализ проводился по имеющимся характеристикам дизеля. В дальнейшем планируется уточнение, закладываемой в систему управления характеристики наилучшей топливной экономичности с учетом параметров тягового генератора и тяговых электродвигателей.

Результаты проведенного моделирования процессов управления транспортным средством

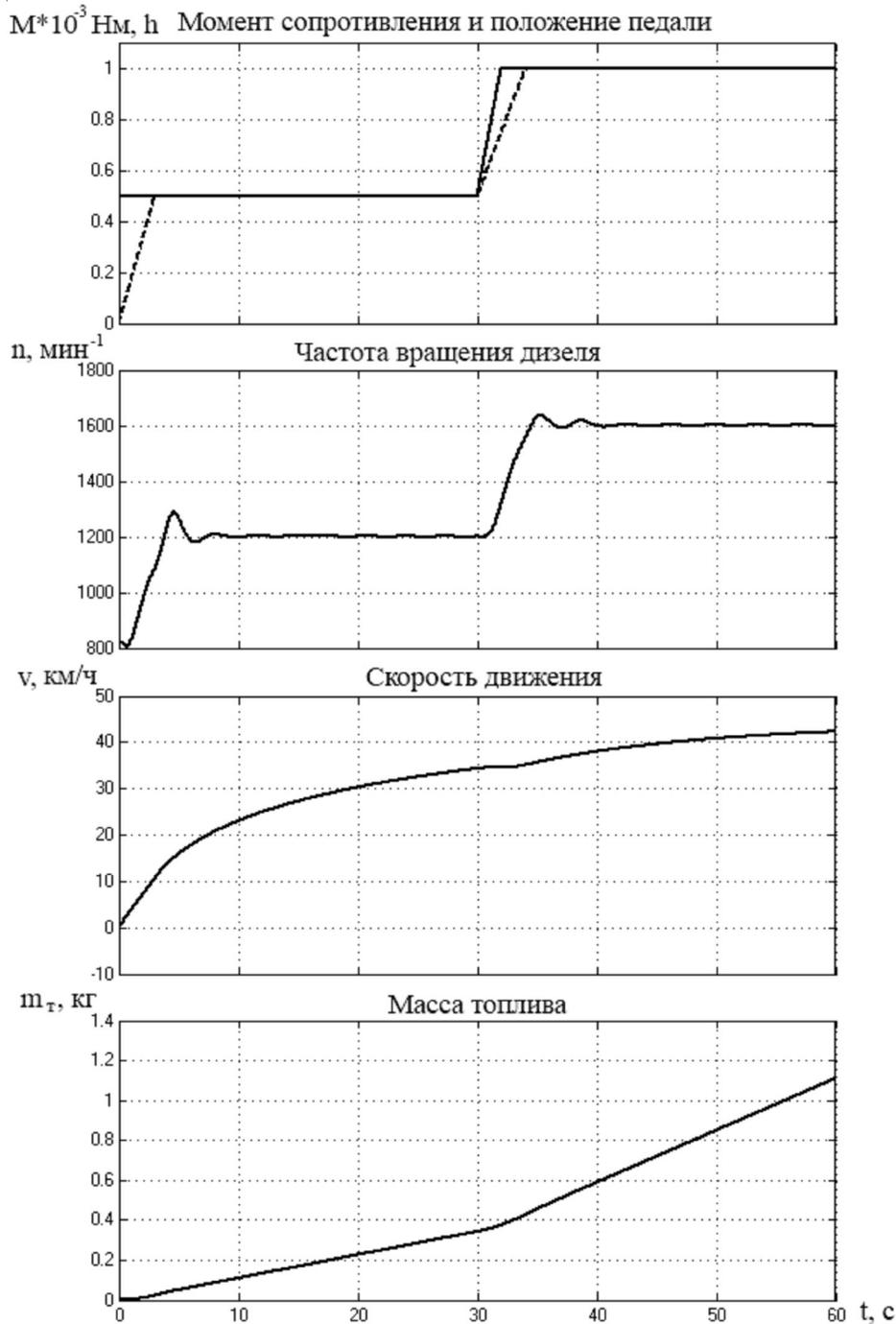


Рис. 4. Результаты моделирования процессов управления

позволяют обоснованно подойти к выбору стратегии управления энергетической установкой, исходя из возможностей дизеля по обеспечению движения транспортного средства, и оценить экономию топлива при работе дизеля по линии минимальных расходов топлива.

Разработанная модель транспортного средства дает возможность проводить моделирование и других вариантов стратегий управления и оценивать их эффективность по динамичности управления и экономичности работы энергетической установки.

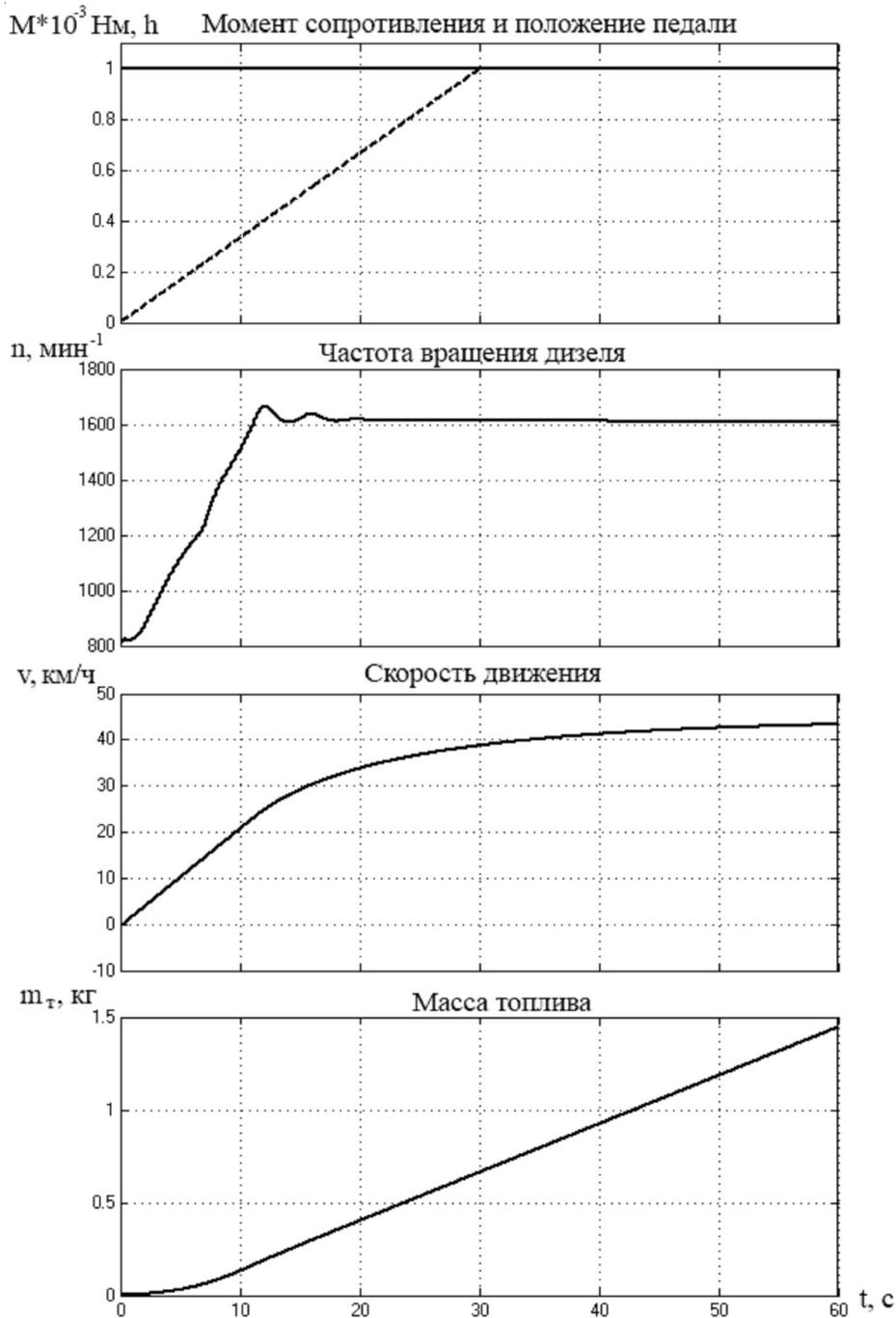


Рис. 5. Результаты моделирования процессов управления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боковиков, А. Н. Математическая модель системы воздухооборудования автомобильного дизеля для полунатурного моделирования его динамических режимов / А. Н. Боковиков, А. Г. Кузнецов // Грузовик. – 2009. – № 11. – С. 30–33.
2. Кузнецов, А. Г. Метод реконструкции исходных данных для составления математических моделей дизелей / А. Г. Кузнецов, А. С. Кулешов, С. В. Харитонов // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 49–54.
3. Кузнецов, А. Г. Динамическая модель дизеля / А. Г. Кузнецов // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 30–33.
4. Кузнецов, А. Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза / А. Г. Кузнецов // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2009. – № 3. – С. 49–56.
5. Кузнецов, А. Г. Математическая модель системы автоматического регулирования дизелем с турбонаддувом / А. Г. Кузнецов, В. А. Марков, В. Л. Трифионов // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2000. – № 4. – С. 106–119.
6. DIESEL-RK is an engine simulation tool. – Electronic text data. – Mode of access: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru>. – Title from screen.
7. Eriksson, L. Modeling and Control of Turbocharged SI and DI Engines. Oil & Gas Science and Technology / L. Eriksson // Rev. IFP. – 2007. – Vol. 62, № 4. – P. 523–538.
8. Freeland, P. Mahle range extender. System and vehicle. Special Edition MAHLE Performance / P. Freeland. – 2013. – с. 8–11.
9. Sortland, S. Hybrid propulsion system for anchor handling tug supply vessels / S. Sortland // Wärtsilä technical journal. – 2008. – с. 45–48.

REFERENCES

1. Bokovikov A.N., Kuznetsov A.G. Matematicheskaya model sistemy vozdukhosnabzheniya avtomobilnogo dizelya dlya polunaturnogo modelirovaniya ego dinamicheskikh rezhimov [A Mathematical Model of the Air Supply System for Automotive Diesel for Scaled-Down Simulation of Dynamic Modes]. *Gruzovik*, 2009, no. 11, pp. 30-33.
2. Kuznetsov A.G., Kuleshov A.S., Kharitonov S.V. Metod rekonstruktsii iskhodnykh dannykh dlya sostavleniya matematicheskikh modeley dizeley [Method of Reconstruction of the Source Data for the Compilation of Mathematical Models of Diesel Engines]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2014, no. 5, pp. 49-54.
3. Kuznetsov A.G. Dinamicheskaya model dizelya [The Dynamic Model]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2010, no. 2, pp. 30-33.
4. Kuznetsov A.G. Dinamicheskaya model energeticheskoy ustanovki teplovoza [The Dynamic Model of the Power Plant of Locomotive]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 2009, no. 3, pp. 49-56.
5. Kuznetsov A.G., Markov V.A., Trifonov V.L. Matematicheskaya model sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya dizelem s turbonadduvom [Mathematical Model of Automatic Control System for a Diesel Engine With Turbocharger]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 2000, no. 4, pp. 106-119.
6. DIESEL-RK is an Engine Simulation Tool. Available at: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru>.
7. Eriksson L. Modeling and Control of Turbocharged SI and DI Engines. Oil & Gas Science and Technology. *Rev. IFP*, 2007, vol. 62, no. 4, pp. 523-538.
8. Paul Freeland. Mahle Range Extender. System and Vehicle. *MAHLE Performance*, 2013, pp. 8-11.
9. Sortland S. Hybrid Propulsion System for Anchor Handling Tug Supply Vessels. *Wartsila Technical Journal*, 2008, pp. 45-48.

**SIMULATION OF THE PROCESSES  
OF DRIVING TRANSPORT VEHICLE  
WITH DIESEL AND ELECTRIC DRIVETRAIN**

**Ivashchenko Nikolay Antonovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department E-2,  
Bauman Moscow State Technical University  
[ivaschen@mail.ru](mailto:ivaschen@mail.ru)  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Kuznetsov Aleksandr Gavriilovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Thermophysics,  
Bauman Moscow State Technical University  
kuzag441@mail.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Kharitonov Sergey Viktorovich**

Postgraduate Student, Department of Thermophysics,  
Bauman Moscow State Technical University  
devilfess@mail.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Kuznetsov Sergey Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Department of Electrical Technology and Industrial Electronics,  
Bauman Moscow State Technical University  
kuznetsovsergey@inbox.ru  
2-ya Baumanskaya St., 5, 105005 Moscow, Russian Federation

**Abstract.** One of the advantages of vehicles with a combined power type, comprising a heat engine and the electric drivetrain is the use of adaptive management, in which the elements of the energy plants operate in modes optimized for the selected index.

In this paper we consider a vehicle with a diesel engine as a source of energy and electric transmission, including the generator and traction motors driving the wheels. The authors had the task to develop the driving algorithm ensuring work for diesel modes with the best efficiency.

The paper proposes several methods of controlling the vehicle, providing work for the characterization of diesel minimal fuel consumption.

To investigate the control options in the design stage of the vehicle, the mathematical model of the power plant and computer simulation program management processes were developed. Verification of the developed model, conducted by the results of bench tests, confirmed the possibility of its use to generate control algorithms at power plants.

The simulation of different management options of vehicle operating conditions has influence on the characteristics of diesel minimal fuel consumption. The dynamic processes change the basic parameters of the vehicle for the considered control.

These simulation results of energy management options allow reasonably come to the formation of vehicle control algorithms which optimize the efficiency of diesel engine.

**Key words:** diesel, electric drivetrain, management processes, diesel efficiency, simulation.