

УДК 621.436

А. Г. Кузнецов

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

Приведены результаты полунатурного моделирования динамических режимов энергетической установки тепловоза и системы управления на разработанном стенде. При моделировании проведены проверка работоспособности стенда и адекватности математических моделей, а также исследование влияния настроек регулятора на качество процессов управления энергетической установкой.

E-mail: kuznetsov@power.bmstu.ru

Ключевые слова: моделирование, энергоустановка, тепловоз, динамический режим.

На определенном этапе разработки систем автоматического управления (САУ) энергетических установок целесообразно использовать полунатурное моделирование, при котором натурные элементы системы управления сопрягаются с компьютерной моделью энергетической установки. Это дает возможность сокращать сроки разработки проекта и экономить средства, заменяя имитационным моделированием дорогостоящие натурные испытания. Полунатурное моделирование динамических процессов осуществляется в реальном масштабе времени, что накладывает жесткие требования на быстродействие используемых математических моделей.

Для проведения полунатурного моделирования динамических режимов энергетической установки тепловоза 2ТЭ116 разработан специальный стенд [1], компьютерная часть которого содержит математические модели комбинированного дизеля 16ЧН26/26 [2] и энергетической установки с электрической передачей мощности от дизеля к колесным парам тепловоза [3].

Для проверки работоспособности стенда и адекватности разработанных математических моделей проведено полунатурное моделирование переходных процессов энергетической установки тепловоза 2ТЭ116 на характерных режимах управления движением поезда. Полученные при полунатурном моделировании процессы сравнивались со сходными экспериментальными процессами, снятыми при испытаниях тепловоза в реальных условиях.

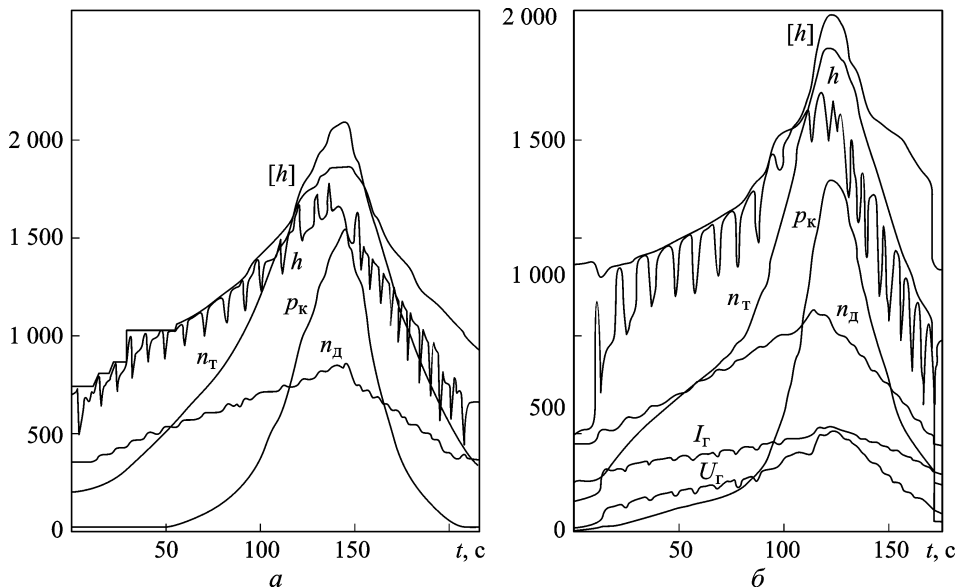


Рис. 1. Процессы управления тепловозом:
a — эксперимент; *б* — полунатурное моделирование

В процессе полунатурного моделирования осуществляется оперативное управление с помощью компьютера режимами работы энергетической установки и движения тепловоза. На экране компьютера в реальном масштабе времени отображаются переходные процессы изменения основных параметров рабочего процесса комбинированного дизеля и энергетической установки. Результаты моделирования сохраняются в памяти компьютера и распечатываются в виде графиков переходных процессов.

В качестве примера на рис. 1 приведены процессы, полученные при следующей программе задания позиций органа управления тепловозом — контроллера машиниста (КМ) — при движении тепловоза: последовательный перевод КМ на позиции $N = 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12$ с работой на каждой промежуточной позиции в течение 10 с и последовательное возвращение на позицию $N = 1$.

В экспериментальных и смоделированных процессах фиксировались следующие параметры, характеризующие работу энергетической установки: частота вращения вала дизель-генератора n_d , мин^{-1} ; частота вращения ротора турбокомпрессора n_t , мин^{-1} ; положение реек топливного насоса высокого давления (ТНВД) h , мм; ограничение положения реек ТНВД, задаваемое регулятором для различных позиций КМ $[h]$, мм; избыточное давление наддувочного воздуха p_k , кПа. В процессах полунатурного моделирования дополнительно к перечисленным параметрам в виде графиков выводились зависимости от времени изменений тока I_Γ и напряжения U_Γ тягового генератора.

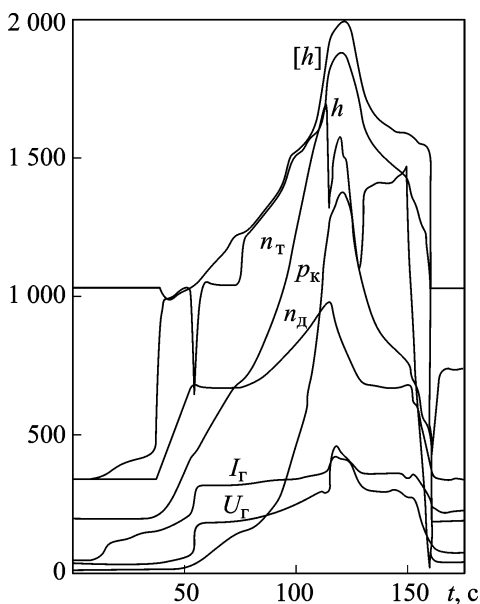


Рис. 2. Процессы управления тепловозом при переводе КМ на позиции $N = 1-8-15-8-1$

моделированные процессы правильно описывают характер изменения основных параметров энергетической установки тепловоза с прогнозируемой при создании моделей погрешностью имитации динамических режимов (не более 10%).

Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного стенда с заложенными математическими моделями, что дало возможность использовать стенд для полунатурного моделирования динамических режимов комбинированного дизеля и энергетической установки тепловоза в широком диапазоне изменения режимов работы установки и настроек САУ.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты полунатурного моделирования процесса управления движением тепловоза при резком переводе КМ на позиции в последовательности: $N = 1-8-15-8-1$.

При полунатурном моделировании проводился также анализ динамики выбросов токсичных компонентов отработавших газов дизеля по оксидам азота и оксиду углерода. На рис. 3 приведены переходные процессы изменения частоты вращения вала дизель-генератора (n_d), расхода топлива (G_T), расхода оксидов азота (G_{NO_x}) и расхода оксида углерода (G_{CO}) при переводе КМ на позиции $N = 1-8-14$. Числовые значения единой шкалы для всех приведенных параметров (см. рис. 3) соответствуют частоте вращения вала дизель-генератора. При определении расходов топлива и токсичных компонентов отработавших газов дизеля необходимо использовать следующие множители:

Для задания значений перечисленных параметров энергетической установки тепловоза на графиках (см. рис. 1) ось ординат использовалась в качестве единой числовой шкалы. Числовые значения n_d и U_T в принятых единицах физических величин определяются непосредственно по принятой числовой шкале. Для определения значений n_T и I_T необходимо числовые значения этих параметров увеличить в 10 раз, для p_K — уменьшить в 10 раз, а для h — уменьшить в 100 раз.

Анализируя результаты полунатурного моделирования и сравнивая результаты расчетных процессов с аналогичными экспериментальными, выявили, что смо-

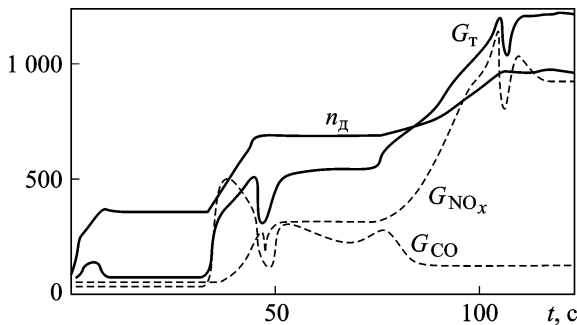


Рис. 3. Процессы изменения расходов топлива, оксидов азота и углерода

для расхода топлива — 10^{-4} , для расхода оксидов азота — 10^{-5} , для расходов оксида углерода — 10^{-6} .

Из рис. 3 следует, что при переходе с первой на восьмую позицию КМ регулятор быстро увеличивает подачу топлива при недостаточном количестве надувочного воздуха из-за инерционности турбокомпрессора. На начальном этапе перехода происходит резкое увеличение выбросов оксида углерода в связи с ухудшением процесса сгорания топлива и снижением коэффициента избытка воздуха. В дальнейшем происходит раскрутка турбокомпрессора и увеличение расхода воздуха, поступающего в цилиндры дизеля. Процесс сгорания улучшается, концентрация и расход оксида углерода с отработавшими газами снижается. Расход оксидов азота увеличивается пропорционально расходу топлива и воздуха. При переходе с восьмой на четырнадцатую позицию снабжение дизеля воздухом достаточно хорошее, процесс сгорания протекает при высокой температуре, что приводит к снижению выбросов оксида углерода и увеличению образования оксидов азота.

В целях исследования влияния настроек регулятора на качество процессов управления энергетической установкой тепловоза проведено полунатурное моделирование движения тепловоза при резком переводе КМ с первой на двенадцатую позицию. При исследовании изменяли значения коэффициентов пропорциональной (k_p) и интегральной ($k_{\text{ин}}$) составляющих пропорционально-интегрального (ПИ) законов регулирования следующих каналов регулятора: программного регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при разгоне; стабилизации частоты вращения вала дизель-генератора на двенадцатой позиции КМ; кратковременного регулирования мощности после окончания режима разгона.

Проведенное исследование показало, что заметное влияние на переходные процессы изменения основных параметров энергетической установки тепловоза оказывает коэффициент пропорциональной составляющей ($k_{п12}$) стабилизации частоты вращения вала дизель-генератора на двенадцатой позиции КМ. На рис. 4 приведены смоделированные переходные процессы при $k_{п12} = 1280$ и $k_{п12} = 9984$.

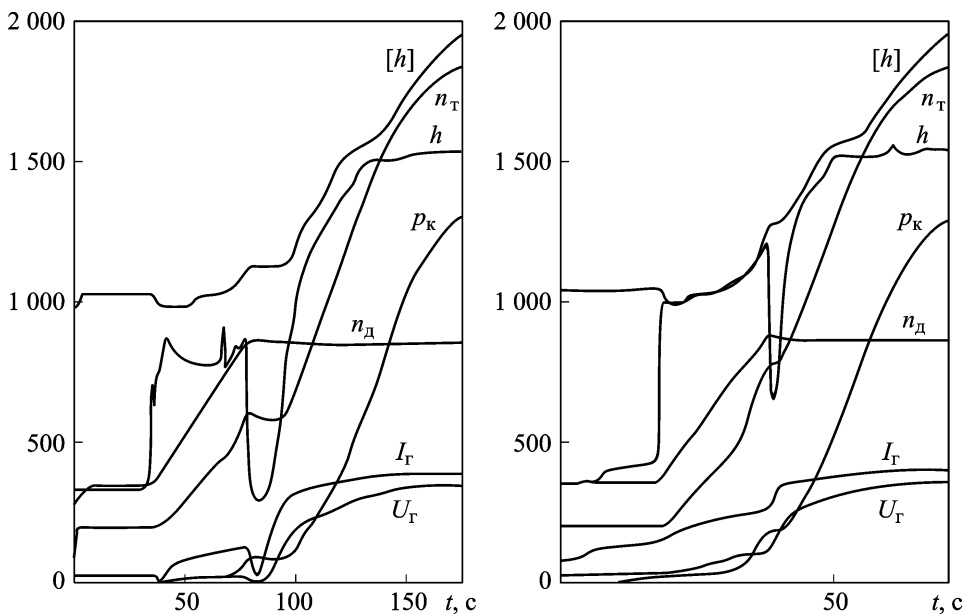


Рис. 4. Переходные процессы САУ при $k_{n12} = 1280$ (а) и $k_{n12} = 9984$ (б)

Коэффициент интегральной составляющей соответствовал исходной настройке $k_{n12} = 192$. На рис. 4 видно, что уменьшение k_{n12} приводит к вялому протеканию процесса перемещения реек ТНВД ($h(t)$). Рейка не доходит до положения ограничения. Происходит значительный по величине и длительный по времени провал положения реек после выхода частоты вращения (n_d) на значение уставки, соответствующей двенадцатой позиции КМ. Этот провал вызывает замедление роста давления наддува (p_k) и уменьшение соответствующего ограничения реек по давлению наддува. Восстановление частоты вращения после превышения значения уставки происходит более медленно. Таким образом, уменьшение k_{n12} приводит к ухудшению качества процессов регулирования частоты вращения вала дизель-генератора.

В целом анализ результатов исследования варьирования настроек каналов регулятора, проведенного методом полунатурного моделирования, показал, что изменение настроек регулятора оказывает определенное влияние на процесс перемещения реек ТНВД, непосредственно связанных с исполнительным устройством регулятора. При этом переходные процессы остальных параметров энергетической установки тепловоза изменяются незначительно, что можно объяснить большой механической инерционностью системы газотурбинного наддува и приводимого в движение поезда — это влияние на энергетическую установку осуществляется через частоту вращения валов тяговых электродвигателей, связанных через редукторы с колесными парами тепловоза. Другая причина полученного эффекта заключается в

том, что важным элементом алгоритма работы регулятора, во многом определяющим протекание переходных процессов, является ограничение темпа набора частоты вращения вала дизель-генератора. Более заметное влияние настроек регулятора на процессы изменения параметров энергетической установки происходит на режимах работы маневрового тепловоза при уменьшении массы движущегося состава.

Полученные в рамках данного исследования результаты показали, что разработанные аппаратные и программные средства в виде специального стенда обеспечивают полунатурное моделирование динамических режимов энергетических установок с дизелями в реальном масштабе времени. Полунатурное моделирование является эффективным средством проектирования и настройки систем управления энергетических установок, а при использовании соответствующих моделей — и других типов промышленных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Г. Стенд полунатурного моделирования динамических режимов энергетических установок с дизелями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 25–29.
2. Кузнецов А. Г. Математическая модель дизеля // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 30–33.
3. Кузнецов А. Г. Динамическая модель энергетической установки тепловоза // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 3. – С. 49–56.

Статья поступила в редакцию 26.11.2010

Александр Гаврилович Кузнецов родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области моделирования и автоматического регулирования теплоэнергетических установок.

A.G. Kuznetsov (b. 1952) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of simulation and automatic regulation of thermal power units.

