

Р. А. Гуняков

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТА С УПРАВЛЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ПРИВОДНОГО ДВС

Решается задача анализа параметров ДВС на уровне цикловых времен рабочего процесса ДВС для использования в системе автоматического управления электроагрегата. Для каждого цикла определяется постоянная времени первого порядка объекта управления, исходя из расчета газодинамических процессов в ДВС на каждом шаге переходного процесса. Предложена методика использования численного эксперимента в системе имитационного моделирования для решения задач управления. *Двигатель внутреннего сгорания; система автоматического управления; упрещение; расчет газовой динамики в цикле; оп- деление постоянной времени в цикле*

Создание современного электроагрегата (ЭА) на базе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) требует разработки многорежимного регулятора оборотов для системы автоматического управления (САУ) электроагрегата, способного работать в комплексе с регулятором электрогенератора в цифровой системе управления ЭА. В связи с отсутствием методики построения подобных систем автоматического управления возникла необходимость в ее создании.

Традиционный подход к разработке источников электроэнергии характеризуется следующим:

1. Как правило, ЭА komponуются из самостоятельных частей: двигателя со своим регулятором и электрогенератора со встроенным регулятором. Для первого компонента учитываются внешние скоростные характеристики ДВС, для второго – токоскоростные характеристики электрогенератора. При этом отсутствует сквозное проектирование САУ, в котором объект управления рассматривается как единый узел, состоящий из приводного двигателя и генерирующей системы.

2. Применяются алгоритмы регулирования «в малом», например ПИД-алгоритмы, при любых, в том числе больших отклонениях управляемой величины, как в первичных двигателях, так и в системах генерирования (СГ).

3. Не учитываются особенности газовой динамики ДВС в неустановившихся режимах.

Анализ показывает, что традиционные дизельные и бензиновые двигатели не исчерпали возможности своего совершенствования. Принципиально, поршневой двигатель внутреннего сгорания, на сегодняшний день, не имеет технико-экономических конкурентов в качестве первичного двигателя. При определенных услови-

ях, возможна конкуренция только со стороны электрохимических генераторов.

На основе анализа современных требований к ЭА сформулированы принципы их проектирования.

1. ЭА должны строиться как единые системы автоматического управления (САУ ЭА) с основными элементами в виде ДВС, системы генерирования, супервизора, выполняющего согласование рабочих точек ДВС и СГ в рамках текущей задачи САУ ЭА.

2. САУ ЭА, путем изменения рабочей точки ДВС в широких пределах по специальному закону, должна достигать экстремумов целевой функции управления по критериям минимума удельного расхода топлива, минимума шумности, минимального времени на переходные режимы ДВС и иных экстремумов или целевых функций, в зависимости от условий, диктуемых окружающей средой и пользователем.

3. При разработке САУ ЭА требуется разрабатывать СГ с изменяемой в зависимости от рабочей точки двигателя, токоскоростной характеристикой и динамическими характеристиками, согласованными с возможностями ДВС. Например, необходимо реализовывать искусственное затягивание переходных процессов в СГ и оптимизировать их траекторию. Кроме того, для случая мгновенного подключения СГ на максимальную нагрузку, следует реализовать имитацию центробежной муфты, а для случая мгновенного полного отключения нагрузки от СГ – имитацию ограничителя оборотов ДВС.

4. Следует реализовать перестраивание структуры САУ в зависимости от величины отклонения в системе управления. Классические алгоритмы регулирования в малых отклонениях в системе управления, должны заменяться на контроллерные алгоритмы при больших отклонениях.

Далее в статье рассматриваются задачи, связанные с управлением приводным ДВС ЭА.

Один из принципов проектирования САУ ЭА касается необходимости перестраивания структуры САУ. Речь идет о смене алгоритма управления расходом воздуха в ДВС в зависимости от величины отклонения в системе управления.

Большинство современных систем управления являются аналого-цифровыми, поскольку приложенные к ним воздействия и отклонения по своей физической природе обычно соответствуют непрерывным функциям времени [2].

На рис. 1 приведена структурная схема микропроцессорной САУ ЭА.

Как правило, ЦУУ реализует параметрический ПИД-регулятор, описываемый в рекуррентном виде следующим образом [1]:

$$u_k = u_{k-1} + q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2},$$

где u_k – управляющее воздействие на текущем шаге, u_{k-1} – управляющее воздействие на предыдущем шаге, e_k – текущее отклонение, e_{k-1} и e_{k-2} – отклонения соответственно на предыдущем шаге и отклонение 2 шага назад, параметры q_0, q_1, q_2 :

$$q_0 = K(1 + \frac{T_0}{2T_1} + \frac{T_D}{T_0}), \quad q_1 = -K(1 - \frac{T_0}{2T_1} + 2\frac{T_D}{T_0}),$$

$$q_2 = K\frac{T_D}{T_0},$$

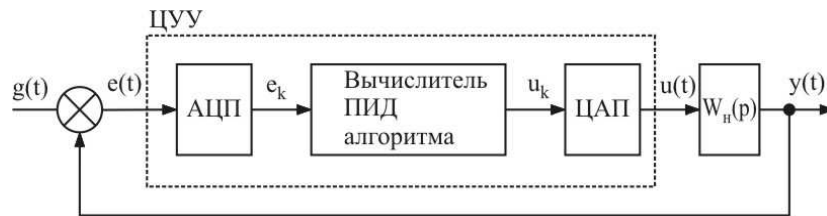


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорной САУ ЭА: $g(t)$ – задающее воздействие (уставка угловой скорости); $e(t)$ – текущее отклонение; e_k – отклонение на текущем шаге расчета; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; u_k – управляющее воздействие на текущем шаге расчета; $u(t)$ – управляющее воздействие в непрерывном масштабе времени; $W_n(p)$ – передаточная функция объекта управления; $y(t)$ – выходной сигнал, ЦУУ – цифровое управляющее устройство

где T_0 – шаг квантования по времени, T_1 – постоянная интегрирования, T_D – постоянная дифференцирования, K – коэффициент передачи регулятора. Переход к другой структуре реализован следующим образом. В вычислителе ПИД-алгоритма происходит сравнение текущего значения отклонения с предварительно заданным, и в случае их неравенства происходит перестраивание структуры САУ для осуществления нелинейного контроллерного алгоритма управления.

На рис.2 показана схема САУ, реализующая алгоритм контроллерного управления.

На рис. 2: $g(t)$ – задающее воздействие (уставка угловой скорости); g_k – задающее воздействие на текущем шаге; $e(t)$ – текущее отклонение; e_k – отклонение на текущем шаге расчета; $W_n(p)$ – передаточная функция системы без обратной связи; $v(t)$ – сигнал обратной связи по угловой скорости; v_k – сигнал обратной связи по угловой скорости (текущая угловая скорость); u_k – управляющее воздействие на текущем шаге расчета, $u(t)$ – управляющее воздействие в непрерывном масштабе времени.

$W_n(p)$ – передаточная функция объекта управления;

β – коэффициент передачи в цепи обратной связи;

$y(t)$ – выходной сигнал.

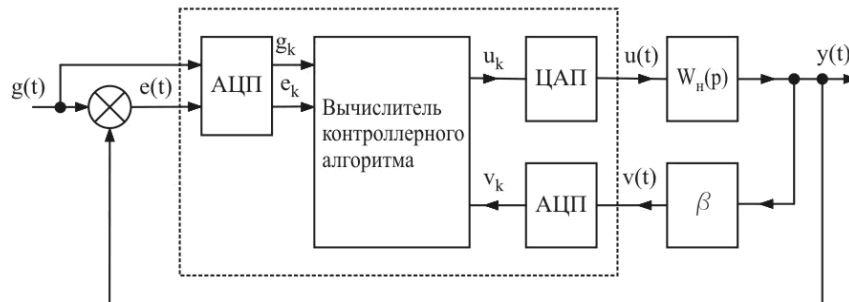


Рис. 2. САУ с контроллерным алгоритмом управления

Характеристики этого контроллера описываются следующим уравнением:

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max}, & g(t) > v(t), \\ u_{k-1} + q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2}, & g(t) = v(t), \\ u_{\min}, & g(t) < v(t), \end{cases}$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие в непрерывном масштабе времени; u_{\max} – управляющее воздействие максимальной величины; u_{\min} – управляющее воздействие минимальной величины; $v(t)$ – текущее значение угловой скорости, $g(t)$ – уставка угловой скорости.

Перестраивание структуры САУ происходит в следующем порядке. Как только возникает рассогласование фактического и требуемого значений угловой скорости, подается управляющее воздействие максимально либо минимально возможной величины (полное открытие либо полное закрытие дросселя) для коррекции этой ошибки. Когда скорость достигает требуемой величины, происходит переключение на алгоритм ПИД-регулирования, с помощью которого поддерживается скорость в установившемся состоянии.

Сборка-модель приводного двигателя в системе имитационного моделирования «Альбея» [3] представлена на рис. 3.

Путем варьирования в численном эксперименте коэффициентов передачи и постоянных времени в уравнениях получено семейство переходных характеристик. Переходные процессы в системе с центробежным регулятором и в системе с регулятором с перестраиваемой структурой иллюстрируются на рис. 4 и рис. 5.

Затраты времени на достижение требуемой установившейся скорости в системе с нелинейным контроллером существенно меньше, чем в линейной системе. Таким образом, перестраивание структуры позволяет повысить скорость регулирования. В то же время, величина и время перерегулирования ухудшают показатели переходного процесса. С целью исключения такого поведения ЭА была разработана следующая структура САУ по модели с упреждающей компенсацией по нагрузке (рис. 6).

Супервизор на базе СИМ «Альбея», исходя из оценки текущей рабочей точки ДВС и показаний датчика нагрузки, формирует закон управления расходом воздуха. Этот закон реализуется при помощи регулятора положения дроссельной заслонки (ДЗ). Согласованно с изменением положения ДЗ изменяется ток возбуждения СГ. Эталонное звено позволяет при отклонениях «в малом» реализовывать структуру управления по модели.

Важным элементом структуры является датчик нагрузки. Поскольку время переходного процесса, даже в больших отклонениях, исчисляется единицами или десятками циклов ДВС, возникает проблема быстрого определения нагрузки. При таких временах необходимо анализировать поведение приводного ДВС на уровне циклов в неустановившихся режимах. Такую проблему можно решить только при помощи анализа газовой динамики двигателя в цикле. Система имитационного моделирования «Альбея» позволяет на стадии проектирования рассчитать и оптимизировать переходы на уровне циклов в переходном процессе ЭА.

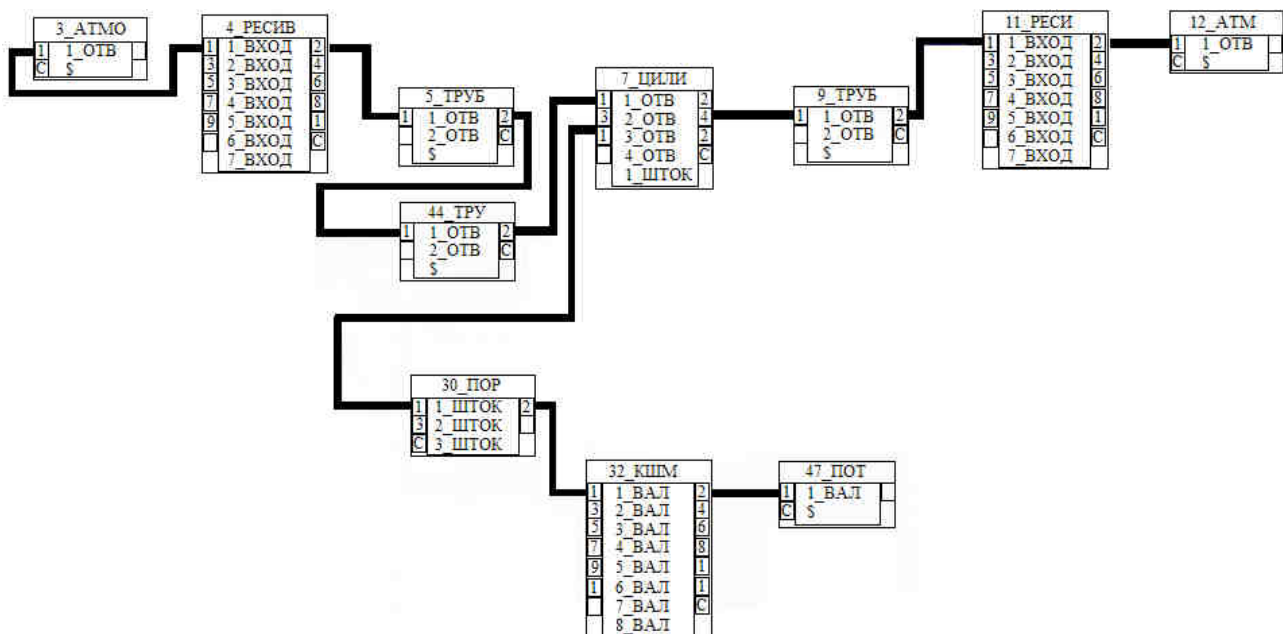


Рис. 3. Сборка двигателя в системе имитационного моделирования «Альбея»

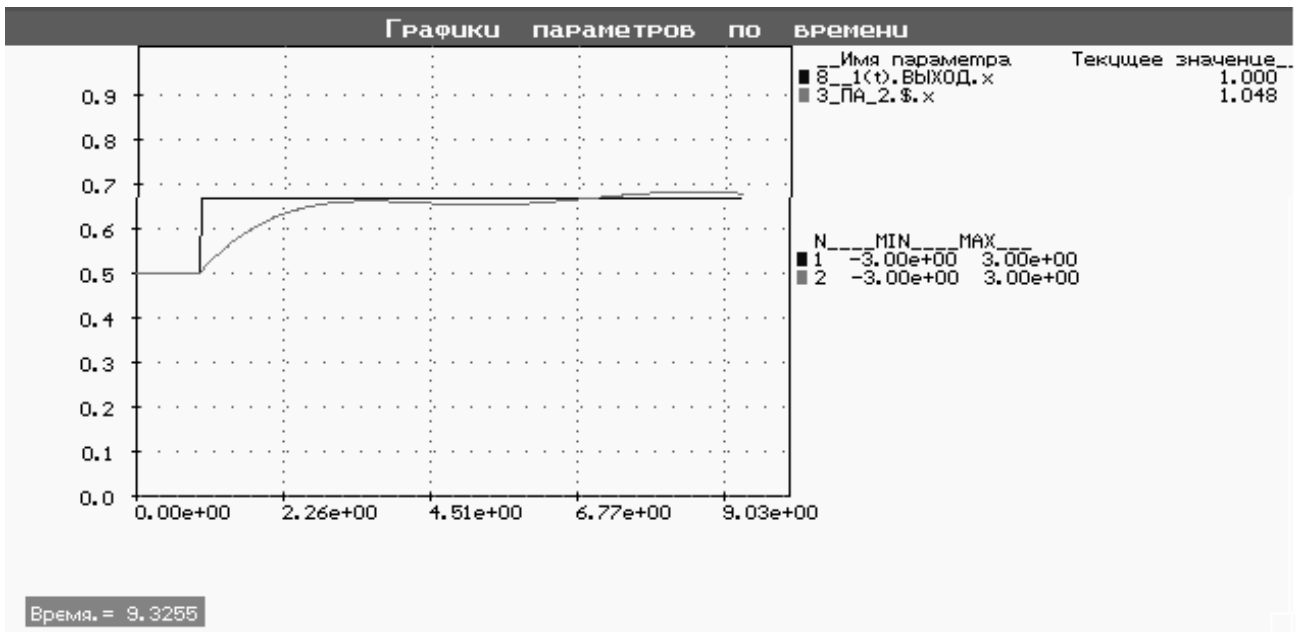


Рис. 4. Переходный процесс в системе управления цикловым расходом воздуха ДВС БЭА с центробежным регулятором при постоянной времени регулятора 0,3 с

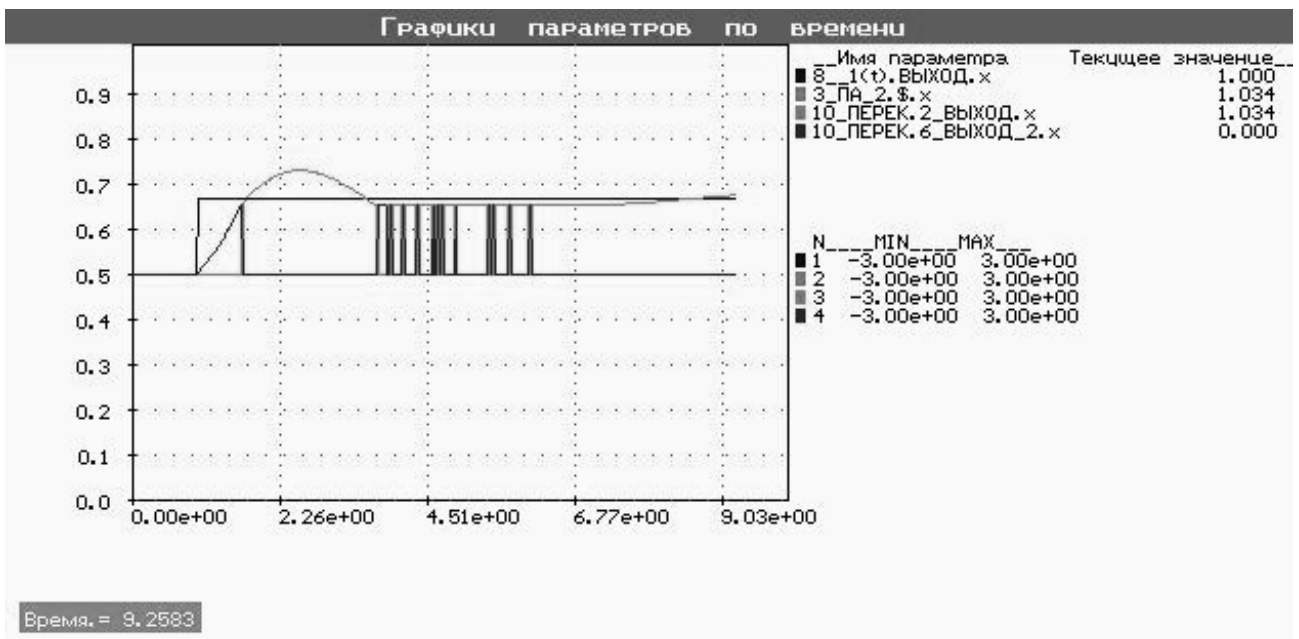


Рис. 5. Переходный процесс в системе с перестраиваемой структурой при постоянной времени 0,3 с

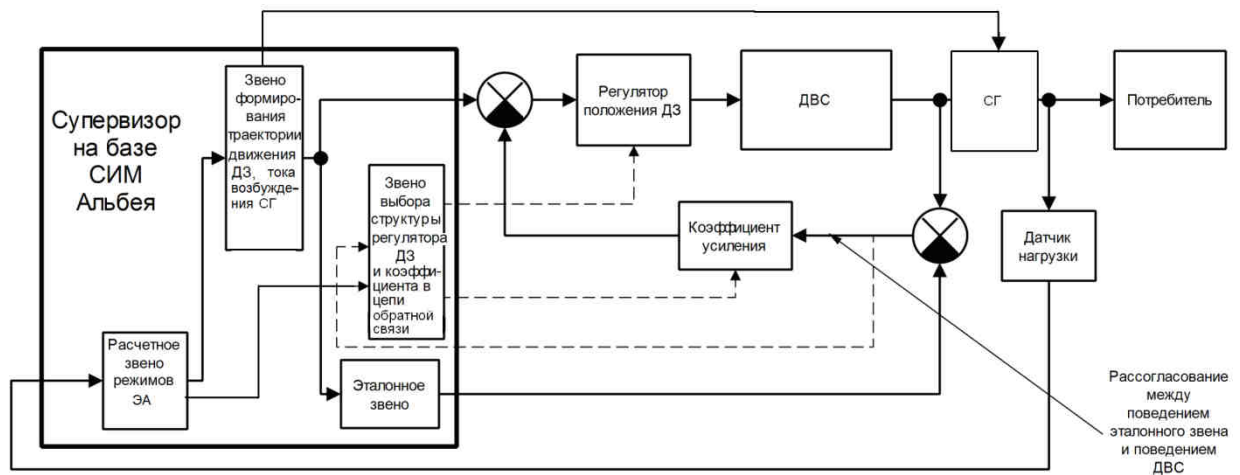


Рис. 6. Структурная схема САУ ЭА

В системе «двигатель-нагрузка», частным случаем которого является ЭА, действуют следующие моменты [4]:

- 1) индикаторный момент, создаваемый газовыми силами (M_i);
- 2) момент, создаваемый инерционными силами вращающихся масс в системе «двигатель-нагрузка» ($M_{ин}$):

$$M_{ин} = J_{пр} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

где $J_{пр}$ – приведенный момент инерции вращающихся масс системы «двигатель-нагрузка», φ – угол поворота коленчатого вала двигателя;

- 3) момент сопротивления потребителя ($M_{п}$);
- 4) момент механических потерь в двигателе ($M_{м}$):

$$M_{м} = B \frac{d\varphi}{dt},$$

где B – коэффициент демпфирования (коэффициент вязкого трения).

Пренебрегая упругими силами и используя второй закон Ньютона для вращательного движения, можно записать уравнение вращательного движения коленчатого вала в виде [4]:

$$M_{ин} + M_{м} = M_i + M_{п}$$

или

$$J_{пр} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + B \frac{d\varphi}{dt} = M_i + M_{п}.$$

С помощью численных экспериментов исследовано поведение индикаторного момента M_i , момента механических потерь $M_{м}$ и частоты вращения коленчатого вала двигателя в цикле (рис. 7).

На рис. 7 индикаторный момент M_i суммирован с моментом, вызываемым инерцией движущихся масс шатуна и поршня.

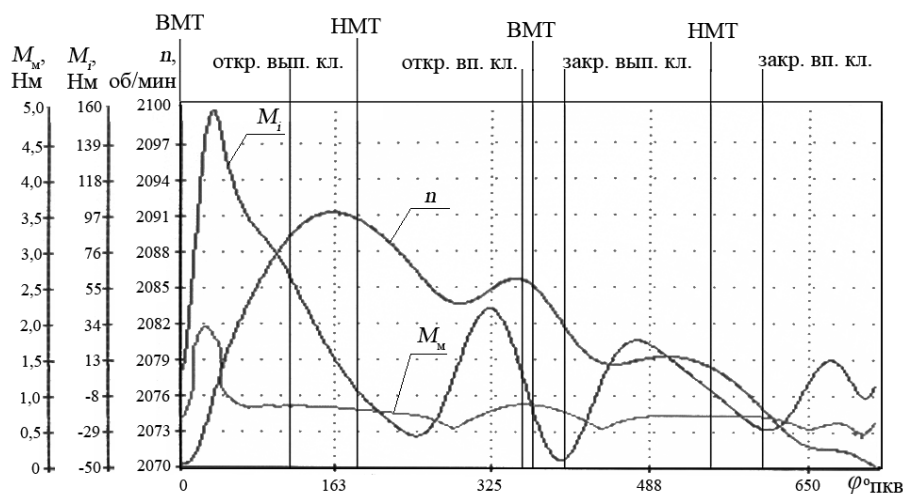


Рис. 7. Моменты в цикле ДВС

Анализ результатов численного моделирования позволил выявить область в фазовой плоскости, где сумма M_i и M_m равна нулю и справедливо выражение $M_n = M_n$, при этом:

$$M_n = J_{пр} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

Рассчитанные параметры позволяют определять постоянную времени ДВС, исчисляемую по формуле $T_{ДВС} = J_{пр}/B$, анализируя поведение кривой M_m в цикле. Таким образом, появляется возможность определения постоянной времени ДВС в любой точке переходного процесса. На основании рассчитанных коэффициентов и постоянных времени формируется оптимизированный по критериям целевой функции переход из текущей рабочей точки двигателя в следующую точку с дискретой в один рабочий цикл.

Для движения по траектории, рассчитанной при помощи СИМ «Альбея», структура САУ переключается на контроллерное управление без обратной связи.

Использование СИМ «Альбея» позволяет корректировать постоянную времени объекта управления в каждом цикле переходного процесса. Оптимизация закона изменения расхода воздуха по результатам расчета параметров рабочего процесса ДВС позволила создать и испытать конструкции ЭА с управляемой частотой

вращения и временем перехода на порядок меньшим, чем при использовании классического ПИД-регулятора по отклонению скорости приводного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Изерман Р.** Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 530 с.
2. **Бессекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
3. Система имитационного моделирования "Альбея" (ядро): руководство пользователя, руководство программиста: учеб. пособие / В.Г. Горбачев [и др.]; Уфимск. госуд. авиац. техн. ун-т. Уфа, 1995. 112 с.
4. **Крутов В. И.** Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1989. 416 с.

ОБ АВТОРЕ



Гуняков Роман Анатольевич, доцент каф. двиг. внутр. сгор. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1980). Канд. техн. наук по автоматизации технологических процессов (УГАТУ, 1990). Иссл. в обл. систем управления ДВС.