



МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.Ю. Афанасьев, Н.А. Рыбушкин, К.А. Килиманов

КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

nikolay_rybushkin@mail.ru

Резюме: Объект исследования – гибридная силовая установка автобуса с дизельным двигателем и синхронным электродвигателем. Цель работы – разработка инженерных моделей синхронного электродвигателя и дизельного двигателя, поиск оптимальных по потреблению электроэнергии законов управления токами электродвигателя и оптимальных по общему энергопотреблению законов движения автобуса с гибридной силовой установкой. Были применены модели синхронного электропривода и двигателя внутреннего сгорания, удобные для исследования, использованы аналитические и численные методы параметрической оптимизации и оптимального управления. Получены значения параметров и законы движения транспортного средства с энергосбережением.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, дизельный двигатель, синхронный электродвигатель, оптимальное управление токами, мощность потерь.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.

Для цитирования: Афанасьев А.Ю., Рыбушкин Н.А., Килиманов К.А. Моделирование и оптимизация по энергопотреблению гибридной силовой установки для транспортного средства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 133-143. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.

MODELING AND OPTIMIZATION ON ENERGY CONSUMPTION OF A HYBRID POWER INSTALLATION FOR A VEHICLE

A.Y. Afanasiev, N.A. Rybushkin, K.A. Kilimanov

KNRTU-KAI named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia

nikolay_rybushkin@mail.ru

Abstract: The object of research is a hybrid power installation of a bus with a diesel engine and a synchronous electric motor. The purpose of the work is the development of engineering models of a synchronous electric motor and a diesel engine, the search for optimal electric currents control laws for electric motor and optimal bus moving laws with a hybrid power installation for general energy consumption. Synchronous electric drive and internal combustion engine models were used, convenient for research, analytical and numerical methods of parametric optimization and optimal control were used. Parameter values and laws of vehicle motion with energy saving are obtained.

Keywords: *hybrid power plant, diesel engine, synchronous electric motor, optimum control of currents, power of losses.*

For citation: *A.Y. Afanasiev, N.A. Rybushkin, K.A. Kilimanov. Modeling and optimization on energy consumption of a hybrid power installation for a vehicle. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 133-143. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-133-143.*

Введение

Гибридные силовые установки (ГСУ) применяются на колесном транспорте для достижения двух основных целей – экономия топлива и уменьшение выброса вредных веществ в атмосферу. Одним из путей экономии энергии является оптимальное управление токами электродвигателя по критерию минимума мощности, потребляемой от источника электроэнергии, при создании требуемого электромагнитного момента, а также оптимальное управление движением инерционного объекта с основными компонентами статического момента по тому же критерию, когда отыскиваются оптимальные законы изменения электромагнитного момента, скорости и пути объекта в функции времени [1].

В настоящей работе приводятся результаты решения этих задач для синхронного двигателя. Проведено моделирование синхронного электродвигателя и дизельного двигателя при их работе на общую нагрузку. Изложена общая методология построения оптимальных законов управления токами ЭД и движением инерционного объекта. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие находить оптимальные законы управления токами ЭД и оптимальные законы движения ТС с переключением скоростей.

Синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением

Рассмотрим синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением. Его электромагнитный момент определяется формулой:

$$M = c_a \Phi I \sin \theta + c_p I^2 \sin 2\theta,$$

где Φ – основной магнитный поток, созданный ротором-индуктором; I – действующее значение тока обмотки якоря (статора); θ – угол между осью МДС обмотки якоря и продольной осью ротора-индуктора; c_a , c_p – конструктивные коэффициенты активного и реактивного моментов [2].

Если магнитопровод двигателя не насыщен, то можно положить:

$$\Phi = k_\Phi i_b,$$

где i_b – ток обмотки возбуждения.

Мощность электрических потерь определяется формулой

$$P = 3rI^2 + r_b i_b^2.$$

Требуется найти токи I , i_b и угол θ , при которых создается требуемый электромагнитный момент M^o , а мощность потерь P минимальна.

В ходе решения данной задачи методом множителей Лагранжа получим формулу для оптимального угла θ :

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{8c_p r_b}{\lambda c_a^2 k_\Phi^2}.$$

Проведем решение задачи оптимального управления токами с помощью теории обобщенной электрической машины [3]. Электромагнитный момент определяется выражением

$$M = p i_q (k_\Psi i_f + \Delta L i_d). \quad (1)$$

Здесь p – число пар полюсов; i_d, i_q – токи продольной и поперечной фаз обобщенной машины, соответствующей синхронному двигателю с электромагнитным возбуждением; i_f – ток обмотки возбуждения; k_Ψ – коэффициент потокоцепления; ΔL – разность индуктивностей продольной и поперечной фаз.

Мощность электрических потерь

$$P = r(i_d^2 + i_q^2) + r_f i_f^2.$$

Здесь r – активное сопротивление фазы статора обобщенной машины; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения.

Найдем токи i_d, i_q, i_f , при которых создается требуемый электромагнитный момент M° , а мощность электрических потерь P минимальная [4].

Составим функцию Лагранжа и запишем условия ее стационарности по всем токам, представив в следующем виде:

$$\begin{aligned} r i_d &= \lambda p i_q \Delta L; \\ r i_q &= \lambda p (k_\Psi i_f + \Delta L i_d); \\ r_f i_f &= \lambda p i_q k_\Psi. \end{aligned} \quad (2)$$

Из этих уравнений можно выразить токи i_d, i_q через ток возбуждения i_f :

$$i_q = \frac{r_f i_f}{\lambda p_\Pi k_\Psi}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{\Delta L r_f i_f}{k_\Psi r}. \quad (4)$$

Подставим эти выражения в уравнение (2) и найдем отсюда множитель Лагранжа λ :

$$\lambda p_\Pi = r \sqrt{\frac{r_f}{r k_\Psi^2 + r_f (\Delta L)^2}}. \quad (5)$$

Соотношение между продольным и поперечным токами обмотки статора определяет угол θ между продольной осью ротора и вектором МДС статора. Справедливо равенство

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{i_q}{i_d} = \frac{r}{\lambda p_\Pi \Delta L}.$$

Его можно представить в виде

$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\frac{r k_\Psi^2 + r_f (\Delta L)^2}{r_f (\Delta L)^2}}.$$

Для определения требуемых токов подставим выражения (3), (4) в формулу (1) и с учетом формулы (5) получаем

$$M = \frac{p_\Pi}{k_\Psi^2} \left(\frac{r_f}{r} \right)^{1/2} \left(k_\Psi^2 + \frac{(\Delta L)^2 r_f}{r} \right)^{3/2} i_f^2. \quad (6)$$

Формула связи мощности электрических потерь и момента имеет вид

$$P = r(i_d^2 + i_q^2) + r_f i_f^2 = \left(\frac{r r_f^2}{(\lambda p_\Pi k_\Psi)^2} + \frac{r (\Delta L r_f)^2}{(k_\Psi r)^2} + r_f \right) i_f^2$$

или, сравнивая с формулой (6),

$$P = c_0 M.$$

С учетом магнитных потерь в стали формула приобретает вид

$$P = M |c_0 + c_1 |\omega| + c_2 \omega^2|.$$

Знаки модуля позволяют применить эту формулу при любом знаке частоты вращения ω .

Дизельный двигатель внутреннего сгорания

Рассмотрим дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) [5]. Внешняя скоростная характеристика мощности ДВС при полной подаче топлива

$$P_{1B} = P_m(a_0\bar{\omega} + a_1\bar{\omega}^2 - a_2\bar{\omega}^3) = P_m k_p(\bar{\omega}),$$

где a_0, a_1, a_2 – постоянные положительные коэффициенты; P_m – максимальное значение мощности при полной подаче топлива и при частоте вращения ω_p ; $\bar{\omega}$ – относительная частота вращения:

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_p.$$

Внешняя скоростная характеристика момента при полной подаче топлива:

$$M_{1B} = M_p(a_0 + a_1\bar{\omega} - a_2\bar{\omega}) = M_p k_M(\bar{\omega}),$$

тогда

$$k_p(\bar{\omega}) = \bar{\omega} k_M(\bar{\omega}).$$

Запас крутящего момента:

$$m_3 = \frac{M_m - M_p}{M_p}.$$

где M_m – максимальный момент при полной подаче топлива, который достигается при частоте вращения ω_M ; M_p – момент при полной подаче топлива и $\omega_1 = \omega_p$.

Коэффициенты a_0, a_1, a_2 находятся по формулам:

$$a_0 = 2 - \frac{1}{4m_3}; \quad a_1 = \frac{1}{2m_3} - 1; \quad a_2 = \frac{1}{4m_3}.$$

Степень использования мощности или момента:

$$u_1 = \frac{P_1}{P_{1B}} = \frac{M_1}{M_{1B}}.$$

Текущая мощность ДВС:

$$P_1 = u_1 P_{1B} = u_1 P_m k_p.$$

Текущий момент ДВС:

$$M_1 = u_1 M_{1B} = u_1 M_p k_M.$$

ДВС имеет расходную характеристику

$$G = G(M_1, \omega_1).$$

Удельный расход топлива g , кг/с·Вт:

$$g = k_\omega k_u g_p,$$

где k_ω – коэффициент, зависящий от частоты вращения:

$$k_\omega = 1,23 - 0,79\bar{\omega} + 0,56\bar{\omega}^2 = b_0 - b_1\bar{\omega} + b_2\bar{\omega}^2,$$

k_u – коэффициент, зависящий от u_1 :

$$k_u = 1,7 - 2,62u_1 + 1,92u_1^2 = d_0 - d_1u_1 + d_2u_1^2,$$

g_p – удельный расход топлива при полной подаче и частоте вращения ω_p .

Секундный расход топлива:

$$G = g M_1 \omega_1 = g P_1 = k_\omega k_u g_p P_m k_p u_1 = u_1 k_p k_u k_\omega G_p,$$

где G_p – максимальный расход топлива при $\omega = \omega_p$:

$$G_p = g_p \cdot P_m.$$

Была составлена модель дизельного двигателя в пакете *Simulink* ПО *Matlab* для построения основных скоростных характеристик ДВС [6]. Приняты следующие значения параметров.

Максимальная мощность $P_m=100$ кВт. Частота вращения при максимальной мощности $\omega_P = 200$ с⁻¹. Удельный расход топлива при этом $g_P = 6 \cdot 10^{-8}$ кг/с·Вт, а секундный расход топлива $G_P = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Частота вращения ω_1 изменялась в пределах от 0 до 250 с⁻¹. На рис. 1 показана данная модель дизельного двигателя.

Для построения характеристик дизельного двигателя была составлена модель содержащая пять моделей дизельных двигателей, на входы которых подаются различные значения степени использования по мощности и одинаковый сигнал по скорости вращения вала. На рис. 2 показаны результаты моделирования, а именно зависимости $M(\omega_1)$, и $G(\omega_1)$ при пяти значениях степени использования u_1 : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0. Отмечены частоты с максимальным моментом ω_M , с максимальной мощностью ω_P и с максимальным потреблением топлива ω_G . Масштабы для величин: $M_1 - 1$; $P_1 - 0,005$; $G - 100\,000$.

Данная модель дизельного двигателя при наличии значений параметров M_m , M_P , ω_P и g_P позволяет моделировать конкретный дизельный двигатель с учетом степени использования по мощности и проводить расчеты секундного расхода топлива.

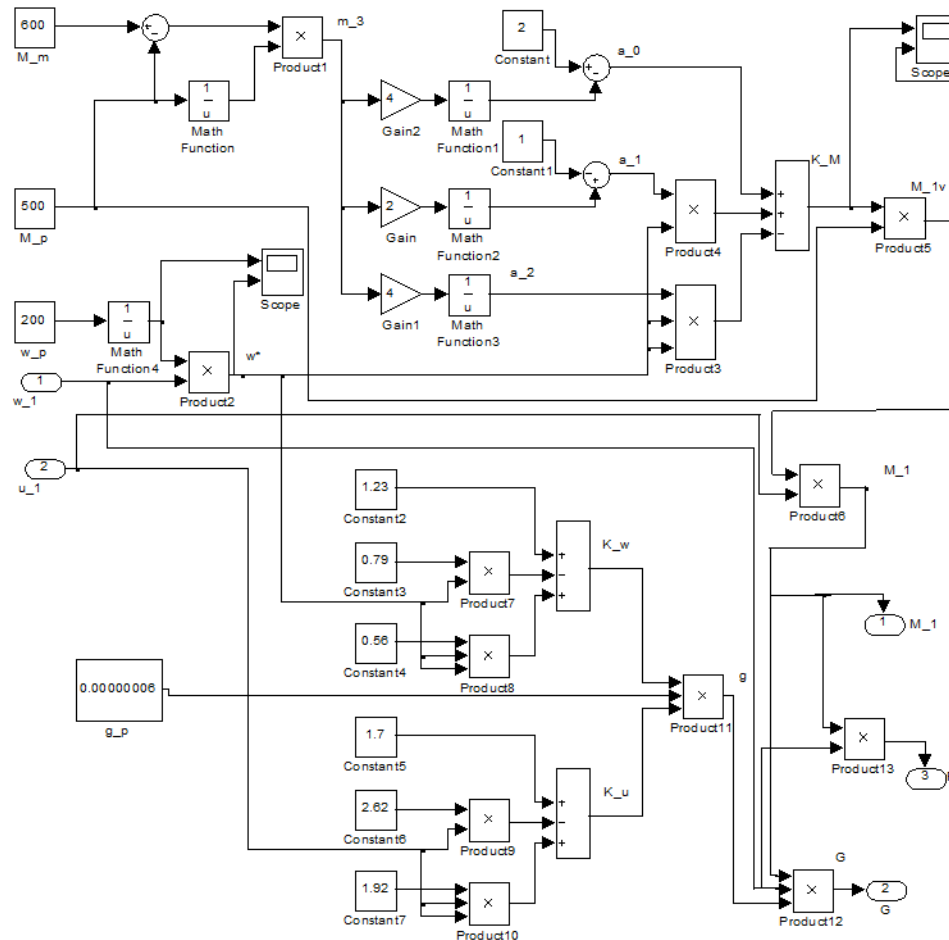


Рис. 1. Модель дизельного двигателя

Оптимальное управление движением ТС с переключением скоростей

Гидромеханическая передача (ГМП), входящая в состав ГСУ, может работать в двух режимах. При трогании и разгоне транспортного средства (ТС) механическая мощность передается через гидротрансформатор (ГТ), у которого частоты вращения входного и выходного валов могут быть произвольными в определенных пределах, а момент передается через рабочую жидкость. Такая механическая связь в теоретической механике называется неголономной (нежесткой) [7].

После набора достаточной скорости ТС происходит переключение ГМП на режим жесткой связи между скоростями входного и выходного валов. Такая механическая связь называется голономной (геометрической, жесткой).

На рис. 3 показана функциональная схема ГСУ с голономной связью [8].

Движение ТС с ГСУ описывается уравнениями

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)] / J_4. \quad (8)$$

Здесь $x_1 = \alpha_4$, $x_2 = \omega_4$ – угол поворота и частота вращения выходного вала ГМП; u_1 – степень использования дизельного двигателя ДВС по мощности и моменту; $u_2 = I$ – ток ЭД; J_4 – суммарный момент инерции ДВС, ЭД, приведенный к выходному валу ГМП; M_{4c} – приведенный статический момент сопротивления.

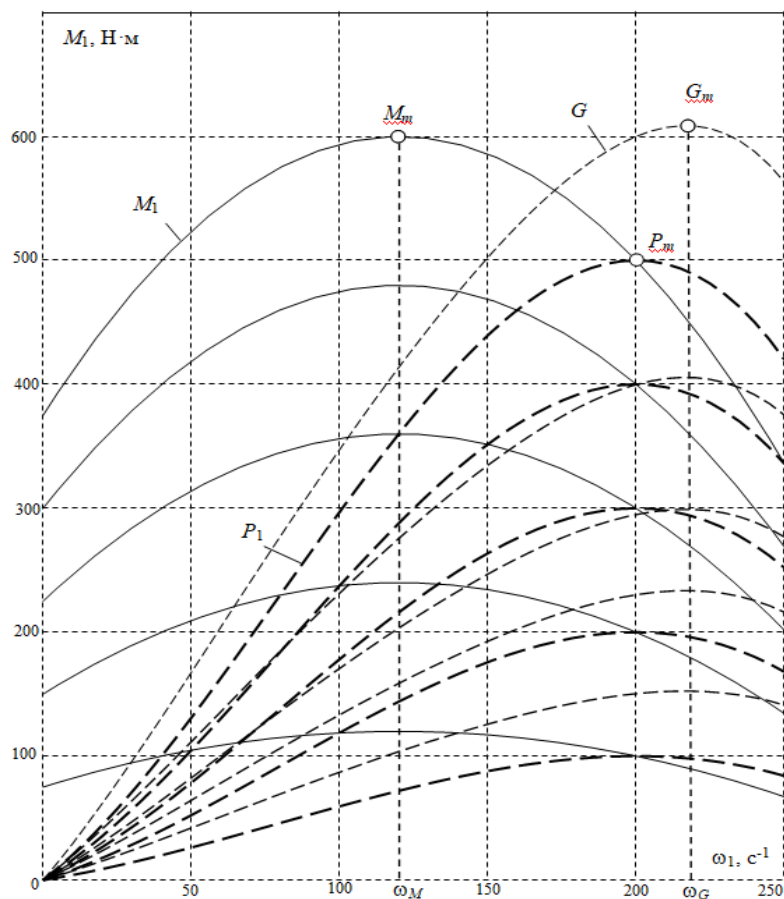


Рис. 2. Скоростные характеристики $M_1(\omega_1)$, $P_1(\omega_1)$ и $G(\omega_1)$

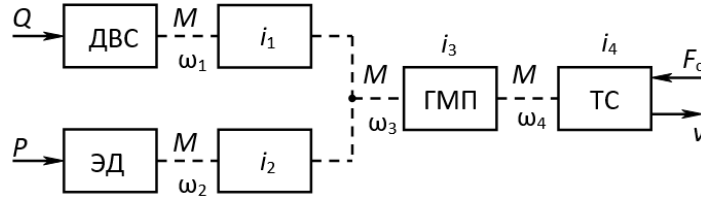


Рис. 3. Функциональная схема ГСУ с голономной связью

Момент ЭД M_2 и момент инерции ЭД пересчитаны на передаточное отношение ДВС i_1 . Момент инерции J_4 определяется по формуле

$$J_4 = J_A + i^2 J_D,$$

где J_A – момент инерции, эквивалентный массе автобуса; J_D – эквивалентный момент инерции ЭД и ДВС; $i = i_1 \cdot i_3$ – передаточное отношение от коленчатого вала ДВС до выходного вала ГМП.

Величины x_1 и x_2 играют роль фазовых координат, а величины u_1 и u_2 – роль управляющих воздействий.

Предполагается, что функции $M_1(u_1, x_2)$, $M_2(u_2)$, $M_c(x_1, x_2)$, $G(u_1, x_1)$, $P(u_2, x_2)$ известны. Задан интервал времени $[t_0, t_f]$, начальные и конечные условия:

$$x_1(t_0) = x_{10}; \quad x_2(t_0) = x_{20}; \quad x_1(t_f) = x_{1f}; \quad x_2(t_f) = x_{2f}.$$

Отметим, что конечное значение x_{1f} принимается произвольным [9].

Требуется найти законы изменения управляющих воздействий $u_1(t)$ и $u_2(t)$, при которых функционал

$$V = \int_{t_0}^{t_f} (a_D G(u_1, x_2) + a_E P(u_2, x_2)) dt \quad (9)$$

имеет минимальное значение. Здесь a_D , a_E – весовые коэффициенты, определяющие ценность дизельного топлива и электрической энергии.

Гамильтониан и дифференциальные уравнения относительно сопряженных переменных имеют вид:

$$\begin{aligned} H &= -a_D G(u_1, x_2) - a_E P(u_2, x_2) + \psi_1 x_2 + \\ &+ \psi_2 [i(M_1(u_1, x_2) + M_2(u_2)) - M_{4c}(x_2)] / J_4 \Rightarrow \max; \\ \frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial x_1} = \frac{\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_1} = 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = a_D \frac{\partial G}{\partial x_2} + a_E \frac{\partial P}{\partial x_2} - \psi_1 - \frac{\psi_2}{J_4} \left(i \frac{\partial M_1}{\partial x_2} - \frac{\partial M_{4c}}{\partial x_2} \right). \quad (11)$$

Примем начальное значение $\psi_1(0) = 0$. Это соответствует случаю, когда конечное значение угла α безразлично, а конечное значение частоты вращения ω управляется с помощью начального значения сопряженной переменной $\psi_2(0)$. Моменты времени переключения t_1 , t_2 могут быть найдены из условия постоянства гамильтониана H .

Условия максимума гамильтониана H по управляющим воздействиям u_1 , u_2 во внутренних точках имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial u_1} &= -a_D \frac{\partial G}{\partial u_1} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_1}{\partial u_1} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial u_2} &= -a_E \frac{\partial P}{\partial u_2} + \frac{i\psi_2}{J_4} \frac{\partial M_2}{\partial u_2} = 0. \end{aligned}$$

Предполагается, что в моменты переключения происходят мягкие (вязкие) удары, в результате которых происходит скачкообразное изменение частот вращения двигателей ТС при сохранении момента количества движения, но с потерей части кинетической энергии. Новые частоты вращения определяются по формулам:

$$x_2(t_1 + 0) = x_2(t_1 - 0)(J_A + i'J_D)/(J_A + i''J_D);$$

$$x_2(t_2 + 0) = x_2(t_2 - 0)(J_A + i''J_D)/(J_A + i'''J_D).$$

Была разработана программа *SYDIHIPE* в системе *Turbo-Pascal*. Эта программа имеет 4 процедуры.

Процедура *GDPEMDME* вычисляет относительную частоту вращения ДВС $\bar{\omega}$, значения коэффициентов $f_M(\bar{\omega})$, $f_P(\bar{\omega})$, $f_{\omega}(\bar{\omega})$, оптимальное значение степени использования ДВС u_1 , коэффициент $f_u(u_1)$, момент ДВС M_1 , секундный расход топлива G , оптимальное значение управления электродвигателем u_2 , его момент M_2 и потребляемую им мощность P , статический момент нагрузки M_{4c} , частные производные от моментов M_1 , M_2 и M_{4c} , от расхода топлива G и мощности P по частоте вращения выходного вала ГМП.

Процедура *DER* проверяет условия достижения времени переключения скоростей ГМП и при выполнении одного из условий вычисляет новые значения частоты вращения входного и выходного валов ГМП согласно гипотезе абсолютно вязкого удара, т.е. с сохранением количества движения (кинетического момента) автомобиля и вращающихся частей. Она вычисляет правые части дифференциальных уравнений движения (7), (8), дифференциальных уравнений сопряженных переменных (10), (11) и суммарного расхода энергетических ресурсов (9). Эта процедура вызывает процедуру *GDPEMDME* один раз.

Процедура *RUNCUT* имеет универсальную форму и выполняет один шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты. Она обращается к процедуре *DER* четыре раза.

Процедура *MAIN* выполняет интегрирование системы из $m = 5$ дифференциальных уравнений. Количество шагов $n = 20\,000$, шаг интегрирования $h = 0,5$ мс. В начале процедуры устанавливается начальное значение передаточного отношения ГМП i , а также начальные значения всех искомым функций, кроме ψ_2 . Логическим переменным *LOG1*, *LOG2* присваивается значение *TRUE*, которое сбрасывается при соответствующем переключении в процедуре *DER*.

В теле цикла со счетчиком j фиксируются значения гамильтониана H до момента переключения ГМП и после него для вычисления приращения гамильтониана. Выполняется рисование графиков на экране дисплея и вызов процедуры *RUNCUT* один раз.

В исполняемой части программы всем параметрам присваиваются их значения, устанавливаются масштабы и цвета рисования.

Выполняются четыре итерации методом Ньютона поиска начального значения сопряженной переменной $\psi_2(0)$ и моментов времени переключения передач ГМП t_1 , t_2 из условия достижения требуемой частоты вращения выходного вала ГМП $\omega(t_f) = 160 \text{ с}^{-1}$ и непрерывности гамильтониана H в моменты переключения t_1 , t_2 . Счетчик цикла – k . После четырех итераций все условия выполняются с высокой точностью.

Результаты вычислений:

Начальный вариант: $\omega(t_f) = 151,32$; $dH_1 = -0,002816$; $dH_2 = -0,000101$.

Первая итерация: $\omega(t_f) = 160,085$; $dH_1 = -0,001362$; $dH_2 = -0,000898$.

Вторая итерация: $\omega(t_f) = 159,975$; $dH_1 = 0,000102$; $dH_2 = -0,000047$.

Третья итерация: $\omega(t_f) = 159,998$; $dH_1 = -0,000002$; $dH_2 = 0,000000$.

Значения искомым величин, соответствующие оптимальному управлению:

$\psi_2(0) = 0,00055477$; $j_{s1} = 8584$; $j_{s2} = 14049$.

Графики сигналов приведены на рис. 4.

Видно, что по мере разгона момент ДД уменьшается при каждом передаточном отношении. После каждого переключения скорости происходит быстрый наброс момента ДД. Далее, по мере разгона момент ЭД растёт [10].

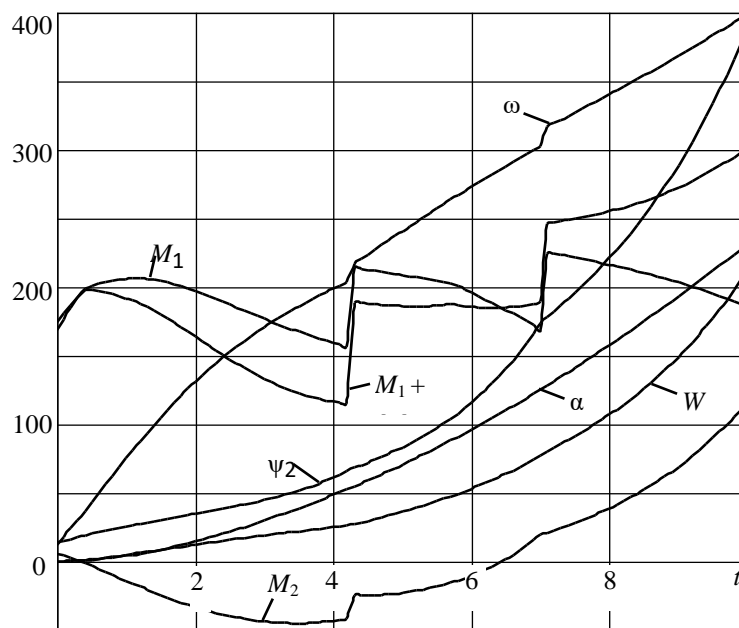


Рис. 4. Графики сигналов при разгоне автомобиля с ГСУ и двумя переключениями скорости

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения работы удалось построить аналитические модели синхронного электродвигателя и дизельного двигателя внутреннего сгорания, позволившие решить задачу оптимального управления токами электродвигателя для создания требуемого электромагнитного момента при минимальной потребляемой мощности и решить задачу оптимального управления движением транспортного средства с переключением скоростей. Данные результаты помогут достичь оптимального использования ЭД и ДВС по выдаваемой суммарной мощности при экономии электрической энергии и дизельного топлива.

Литература

1. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода. Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 208 с.
2. Красовский А.Б. Основы электропривода. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 405 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.
4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. 373 с.
5. Bosch Automotive Handbook. 9th ed. edition. Robert Bosch GmbH, 2014. 1544 p.
6. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Издательство «Корона.Век», 2014. 368 с.

7. Москаленко В.В. Электрический привод. 7-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 368 с.
8. Wang X., He H., Sun F., Sun X., Tang H. Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *Energies* 2013, 6, 5656–5675.
9. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. 3-е изд. М.: «Академия», 2007. 576 с.
10. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург, УГТУ–Упи, 2006. 420 с.

Авторы публикации

Афанасьев Анатолий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: afanasiev_eo@mail.ru.

Рыбушкин Николай Анатольевич – студент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: nikolay_rybushkin@mail.ru.

Килиманов Константин Алексеевич – студент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: kostik.kilimanov@mail.ru.

References

1. Moskalenko V.V. Automated control systems for electric drive. Vologda: Infra-Engineering, 2016. 208 p.
2. Krasovskiy A.B. Basics of the electric drive. Moscow: Publishing house MSTU named after N.E. Bauman, 2015. 405 p.
3. Ivanov-Smolensky A. V. Electric machines. 3rd ed. M.: Publishing house MEI, 2006. 652 p.
4. Anuchin A.S. Control systems of electric drives. Vologda: Infra-Engineering, 2015. 373 p.
5. Bosch Automotive Handbook. 9th ed. edition. Robert Bosch GmbH, 2014. 1544 p.
6. Herman-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. СПб.: Publishing house "Korona.Vek", 2014. 368 p.
7. Moskalenko V.V. Electric drive. 7th ed. Moscow: Publishing Center "Academy", 2014. 368 p.
8. Wang X., He H., Sun F., Sun X., Tang H. Comparative study on different energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *Energies* 2013, 6, 5656–5675.
9. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes. 7th ed. M.: "Academy", 2007. 576 p.
10. Polyakov V.N., Shreiner R.T. Extreme control of electric motors. Ekaterinburg, USTU–Upi, 2006. 420 p.

Authors of the publication

Afanasyev Anatoly Yurievich – Grand PhD in Engineering sciences, Professor Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. Email: afanasiev_eo@mail.ru.

Rybushkin Nikolay Anatolevich – student Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. E-mail: nikolay_rybushkin@mail.ru.

© А.Ю. Афанасьев, Н.А. Рыбушкин, К.А. Килиманов

Kilimanov Konstantin Alekseevich – student Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. E-mail: kostik.kilimanov@mail.ru.

Поступила в редакцию

11 апреля 2018 г.