

А. А. Колесников, д-р техн. наук, проф., ankolesnikov@sfedu.ru, **Д. С. Калий**, аспирант, kaliy.d@yandex.ru,
И. А. Радионов, канд. техн. наук, доц., radionovivan@sfedu.ru,
О. И. Якименко, аспирант, iakimenko_olga@mail.ru,
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Южного федерального университета, г. Таганрог

Синергетическая система управления гибридной силовой установкой¹

Рассмотрена проблема управления гибридной силовой установкой автомобиля, состоящей из двигателя внутреннего сгорания, синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и синхронного генератора. Формирование управляющего воздействия осуществляется с учетом связи вышеперечисленных объектов друг с другом с помощью планетарной передачи. Математические модели трех перечисленных двигателей являются нелинейными с несколькими каналами управления. Кроме того, принцип действия гибридной силовой установки требует одновременной работы данных двигателей и, соответственно, построения необходимых взаимосвязанных управляющих воздействий. Для синтеза законов векторного управления гибридной силовой установкой используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). В рамках этого метода возможна работа с полной нелинейной моделью объекта управления. В отличие от традиционного подхода — конструирования отдельного стабилизирующего управления для каждого канала регулирования — в этом методе используется совместное управление по всем переменным в целях перевода объекта в желаемое состояние. В этом случае для ряда вариантов алгоритмов управления связи между каналами управления осуществляются не косвенно через объект управления, а непосредственно формируются в регуляторе. Также в законах управления учтены неизвестные внешние возмущения, которые компенсировались с использованием принципа интегральной адаптации.

В данной работе приведен один из режимов работы гибридной силовой установки во время разгона автомобиля. Сначала работает только электродвигатель, по мере разгона автомобиля подключается двигатель внутреннего сгорания, и на больших скоростях автомобиля работает только он. Данный режим работы гибридной силовой установки позволяет использовать оба двигателя в наиболее удобном для них диапазоне угловых скоростей, что приводит к экономичному расходу топлива и заряда аккумуляторных батарей. Кроме того, второй электродвигатель работает в генераторном режиме и переводит часть механического момента на подзарядку аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: синергетический подход, синтез регулятора, гибридная силовая установка, двигатель внутреннего сгорания, электродвигатель, генератор

Введение

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют обширную область применения и являются основой как коммерческого транспорта (дизели), так и транспортных средств (бензиновые двигатели). Поскольку требования к экономичности, мощности и экологическим показателям двигателей ужесточаются, имеются несколько направлений развития современного автомобилестроения: во-первых, это совершенствование ДВС [1–4], во-вторых, работа автомобиля полностью или частично на электродвигателе [5–7].

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00924 А).

Отличительной особенностью гибридной силовой установки [8, 9] является использование двух и более источников энергии и соответствующих им двигателей, преобразующих энергию в механическую работу. Несмотря на многообразие источников энергии (тепловая энергия бензина или дизельного топлива, электроэнергия, энергия сжатого воздуха, энергия сжатого сжиженного газа, солнечная энергия, энергия ветра и др.) в промышленном масштабе на гибридных автомобилях используется комбинация ДВС и электродвигателя. Главное преимущество гибридного автомобиля заключается в существенном сокращении расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу, которое достигается путем использования электродвигателя, а также в со-

хранении необходимой мощности и в возможности подзарядки аккумуляторных батарей с помощью ДВС.

В данной статье рассматривается синергетическая система управления гибридной силовой установкой.

Особенности гибридной силовой установки как объекта регулирования

Гибридная силовая установка включает в себя три основных элемента (рис. 1): ДВС, большой электродвигатель и малый электродвигатель, который в основном работает в генераторном режиме. Три перечисленных двигателя соединены планетарным редуктором (рис. 2), который распределяет крутящие моменты между двигателями и колесами автомобиля.

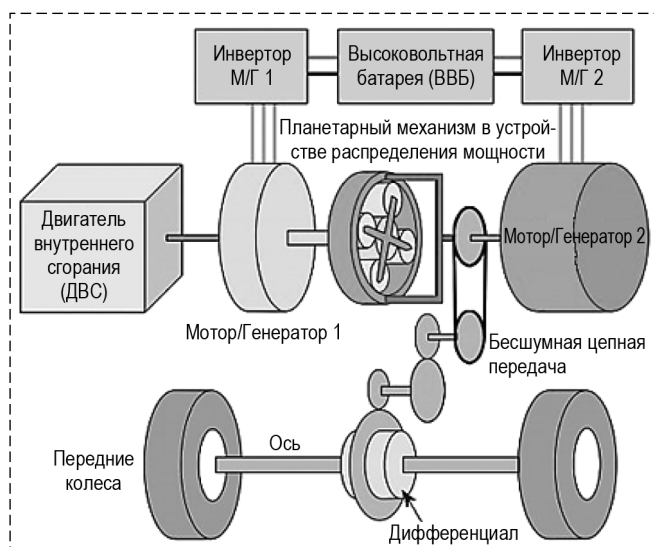


Рис. 1. Структурная схема гибридной силовой установки

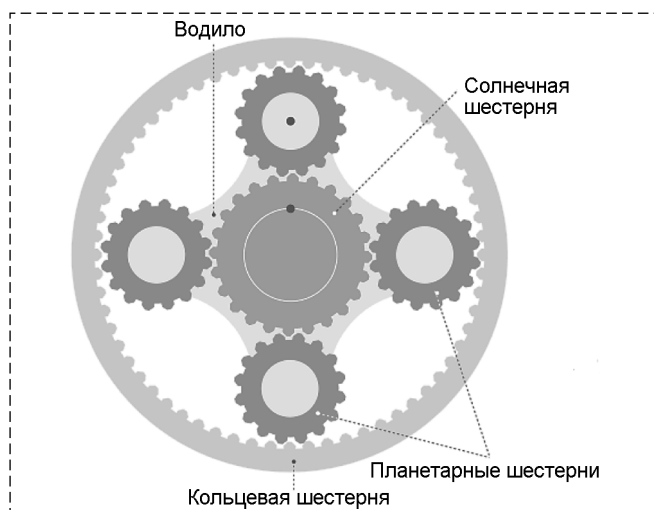


Рис. 2. Структурная схема планетарного механизма

ДВС вращает водило с планетарными шестернями, электродвигатель — кольцевую шестерню, а генератор вращает солнечную шестерню для обеспечения дополнительной мощности или снимает с нее мощность для заряда аккумуляторных батарей. Планетарный механизм соединен с осью колес с помощью цепной передачи.

Математическое описание объекта регулирования

Для построения математической модели гибридной силовой установки используются математические модели ДВС, электродвигателя и генератора.

В математическую модель ДВС входят три уравнения, описывающих динамику объекта [10]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= y_2/J - b_{12}M_l; \\ \dot{x}_2 &= -a_2x_2 + b_2u_1; \\ \dot{x}_3 &= -a_3x_1x_3 + b_3\varphi_1(x_3)\varphi_2(u_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_1 = \omega$ — скорость вращения коленчатого вала; $x_2 = \mu_{ff}$ — поток массы топливной пленки; $x_3 = P$ — давление во впускном коллекторе; $u_1 = \mu_{fi}$ — количество впрыснутого в цилиндр топлива; $u_2 = \alpha$ — угол поворота дроссельной заслонки; $u_3 = \alpha_{ign}$ — угол опережения зажигания; $y_1 = (c_1x_2 + d_1u_1)/x_1x_3 = \varphi$ — соотношение воздух—топливо; $y_2 = c_2x_3\varphi_3\varphi_4 - c_{f0} - c_{f1}x_1 - c_{f2}x_1^2 = M$ — эффективный момент; M_l — момент внешней нагрузки.

Функции $\varphi_1(x_3)$ — поток воздуха, проходящий через единицу площади; $\varphi_2(u_2)$ — площадь открываемого дроссельной заслонкой отверстия; $\varphi_3(y_1)$, $\varphi_4(x_1, u_3)$ — статические функции, получаемые экспериментально:

$$\varphi_1(x_3) = \frac{P_a}{\sqrt{RT_a}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)};$$

$$\varphi_2(u_2) \approx \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{\cos(u_2)}{\cos(\alpha_0)} \right);$$

$$\varphi_3(y_1) = -1,2837 y_1^2 + 2,2664 y_1;$$

$$\varphi_4(x_1, u_3) = (-4,6434 \cdot 10^{-4} u_3^2 + 0,0431 u_2) \times (1 - 0,5 \exp(-0,0079 x_1)).$$

Коэффициенты модели ДВС:

$$b_{12} = -\frac{1}{J}; \quad b_2 = \frac{K}{T}; \quad b_3 = \frac{RT_a}{V_m} \eta_t; \quad a_2 = \frac{1}{T};$$

$$a_3 = \eta_c \frac{V_d}{4\pi V_m}; \quad c_1 = \frac{4\pi R T_m F_s}{\eta_c V_d};$$

$$c_2 = \eta_l \eta_c \frac{V_d Q}{4\pi R T_m F_s}; \quad d_1 = \frac{4\pi R T_m F_s (1-K)}{\eta_c V_d}.$$

Параметры двигателя: P_a — давление во впускном коллекторе до дроссельной заслонки; T_a , T_m — температура воздуха до дроссельной заслонки и после нее; D — диаметр дроссельной заслонки; α_0 — угол закрытия дроссельной заслонки; V_m — объем впускного коллектора; V_d — объем цилиндров двигателя; J — приведенный к коленчатому валу момент инерции двигателя; R — газовая постоянная; T — постоянная времени процесса испарения; F_s — стехиометрическое соотношение воздух-топливо; η_l — коэффициент эффективности заполнения впускного коллектора; η_c — коэффициент наполнения цилиндров; Q — теплота сгорания топлива; K — коэффициент, учитывающий, какая часть распыляемого топлива осаждается в пленку; c_{f0} , c_{f1} , c_{f2} — экспериментальные коэффициенты; γ — отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

Математическая модель [11], описывающая динамику синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, записана в системе координат, жестко связанной с ротором (рис. 3):

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= -\frac{R_s}{L_d} x_4 + n_p x_6 x_5 + \frac{u_{1ed}}{L_d}; \\ \dot{x}_5 &= -n_p x_6 x_4 - \frac{R_s}{L_q} x_5 - n_p \frac{psif}{L_q} x_6 + u_{2ed}/L_q; \\ \dot{x}_6 &= \frac{(1,5n_p psif x_5 - Bx_6)}{J_e}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_4 = i_d$ — проекция тока статора на ось d ; $x_5 = i_q$ — проекция тока статора на ось q ; $x_6 = \omega$ — угловая скорость вращения ротора; $u_{1ed} = u_d$ — проекция напряжения статора на

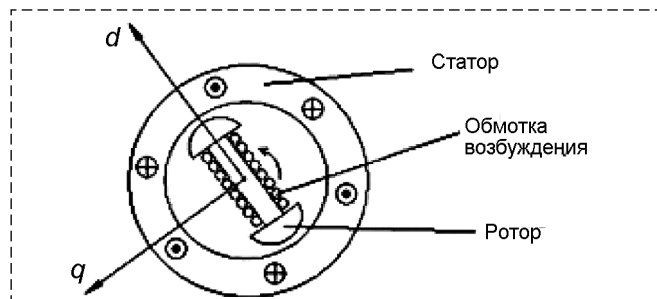


Рис. 3. Система координат, связанная с ротором

ось d ; $u_{2ed} = u_q$ — проекция напряжения статора на ось q ; $M_{ed} = 1,5n_p psif_j q - B\omega$ — эффективный момент.

Параметры электродвигателя: $psif$ — потокосцепление; n_p — число пар полюсов; R_s — сопротивление статора; L_d , L_q — проекции индуктивности по осям d и q ; J_e — момент инерции; B — коэффициент вязкого трения.

Математическая модель синхронного генератора с постоянными параметрами описывается уравнениями в продольных и поперечных осях d и q , жестко связанных с ротором.

Математическая модель включает четыре уравнения, описывающих динамику объекта:

$$\begin{aligned} \dot{x}_7 &= \frac{u_{1eg} - k_n x_{10} x_9 + (L_{dg} - L_{qg}) x_8 x_9}{J_g}; \\ \dot{x}_8 &= f_1; \\ \dot{x}_9 &= \frac{-x_9 R_{eg} - x_7 L_{dg} x_8 - r x_9 + k_n x_7 x_{10}}{L_{qg}}; \\ \dot{x}_{10} &= \frac{u_{2eg}}{L_b} + k_n f_1 - \frac{r_b x_{10}}{L_b}; \\ \dot{x}_{11} &= x_7; \\ f_1 &= \frac{-x_8 R_{eg} - r x_8 + x_7 L_{qg} x_9 + k_n \frac{(u_{2eg} - r_b x_{10})}{L_b}}{L_{dg} \left(1 - \frac{k_n^2}{L_{dg} L_b} \right)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_7 = \omega$ — угловая скорость вращения ротора; $x_8 = i_d$ — проекция тока статора на ось d ; $x_9 = i_q$ — проекция тока статора на ось q ; $x_{10} = i_b$ — ток возбуждения; $x_{11} = \theta$ — угол поворота ротора; $u_{1eg} = M_D$ — механический момент; $u_{2eg} = U_b$ — напряжение обмотки возбуждения.

Параметры генератора: k_n — коэффициент пропорциональности; L_d , L_q — проекции индуктивности по осям d и q ; J_g — момент инерции ротора; R_{eg} — сопротивление нагрузки; r — активное сопротивление; r_b — активное сопротивление обмотки возбуждения; L_b — индуктивность обмотки возбуждения.

Математическую модель гибридной силовой установки получаем путем объединения моделей (1), (2), (3), которые дополняем двумя уравнениями $\dot{z} = \eta(x_1 - x_1^*)$ и $\dot{z}_1 = \eta_1(x_6 - x_6^*)$ динамической модели возмущений, действующих на ДВС и электродвигатель и зависящих от скорости вращения соответствующих двигателей, где η , η_1 — коэффициенты, влияющие на скорость регулирования переменных x_1 , x_6

соответственно; x_1^*, x_6^* — желаемые значения переменных x_1, x_6 .

Механический момент, поступающий на генератор, равен 28 % от общего момента, создаваемого ДВС и электродвигателем:

$$u_{1eg} = 0,28 \left(\frac{1}{3} y_2 + \frac{1}{2} M_{ed} \right),$$

где y_2 — эффективный момент ДВС; M_{ed} — эффективный момент электродвигателя; 72 % общего момента передается на колеса автомобиля. Скорость движения колес автомобиля

$$W_k = \left(\frac{x_1 + 0,65x_6}{k_p k_r} \right),$$

где $k_p = 2$ — коэффициент редукции планетарной передачи; $k_r = 3$ — коэффициент редукции цепной передачи.

Синтез системы управления гибридной силовой установкой

Синтез регулятора проводили методом АКАР [12, 13] синергетической теории управления с использованием принципа интегральной адаптации для компенсации внешних возмущений. В соответствии с данным методом цели управления выражаются в виде инвариантных многообразий $\psi_i = 0$. Данные многообразия должны содержать переменные состояния, в которых непосредственно присутствуют каналы управления. Если в уравнении управляемой переменной нет канала управления, исходная система декомпозируется с помощью внутренних связей до тех пор, пока в уравнении конкретной переменной не появится необходимый "внутренний" канал управления. Затем декомпозированная система "восстанавливается" в исходный вид, а все "внутренние" найденные законы управления объединяются в исходный закон управления в соответствии с поставленной целью.

Для управления разгоном автомобиля с гибридной силовой установкой необходимо регулировать обороты ДВС и электродвигателя.

Для модели ДВС (1) вводится инвариантное многообразие:

$$\psi_1 = b(x_1 - x_1^*) + \gamma z = 0,$$

где b и γ — настраиваемые коэффициенты, которые влияют на скорость регулирования

и скорость накопления ошибки; x_1^* — желаемое значение переменной (в данном случае скорости вращения вала ДВС). Далее решается функциональное уравнение

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0,$$

и находится управляющее воздействие u_1 . Переменная T_1 — настраиваемый параметр, выбираемый исходя из значения постоянной времени переходного процесса.

Для модели электродвигателя (2) вводится следующее инвариантное многообразие: $\psi_1 = x_5 - \phi_1 = 0$, где ϕ_1 — неизвестная функция. Данное многообразие вводится из-за отсутствия управляющего воздействия непосредственно в уравнении, описывающем динамику переменной x_6 . С помощью такого многообразия, учитывающего переменную x_5 , система (2) декомпозируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= -\frac{R_s}{L_d} x_4 + n_p x_6 x_5 + \frac{u_{1ed}}{L_d}; \\ \dot{x}_6 &= \frac{(1,5n_p \psi_{if} \phi_1 - Bx_6 - z_1)}{J_e}; \\ \dot{z}_1 &= \eta(x_6 - x_6^*). \end{aligned}$$

Таким образом, в уравнении, описывающем динамику переменной x_6 , появляется внутренний канал управления в виде неизвестной функции ϕ_1 . Вводится итоговое инвариантное многообразие $\psi_2 = b_1(x_6 - x_6^*) + \gamma_1 z_1 = 0$, решается функциональное уравнение $T_{2ed} \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0$, находится функция ϕ_1 и подставляется в многообразие ψ_1 . Решением функционального уравнения $T_{1ed} \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0$ находится управляющее воздействие u_{2ed} ; b_1, γ_1 — настраиваемые коэффициенты, которые влияют на скорость регулирования и скорость накопления ошибки; x_6^* — желаемое значение переменной x_6 .

Компьютерное исследование системы моделирования

Система управления выполняет следующие цели: на малых скоростях автомобиля (до 30 км/ч) работает электродвигатель (рис. 4), затем подключается ДВС (рис. 5), при этом электродвигатель помогает ДВС разгонять автомобиль (до 60 км/ч), а затем останавливается. На рис. 6 представлен график скорости движения автомобиля, а на рис. 7 — графики

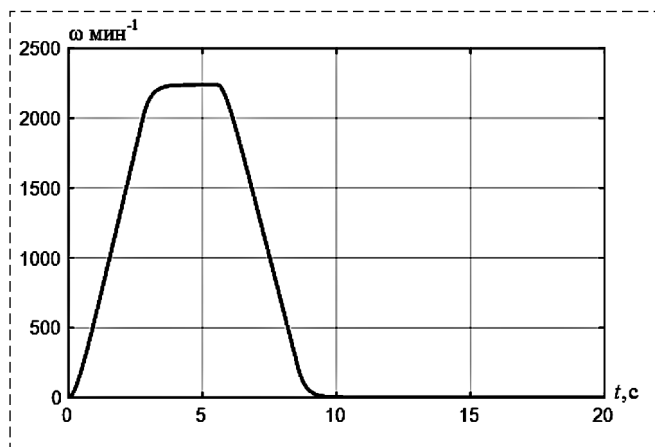


Рис. 4. График скорости вращения ротора электродвигателя

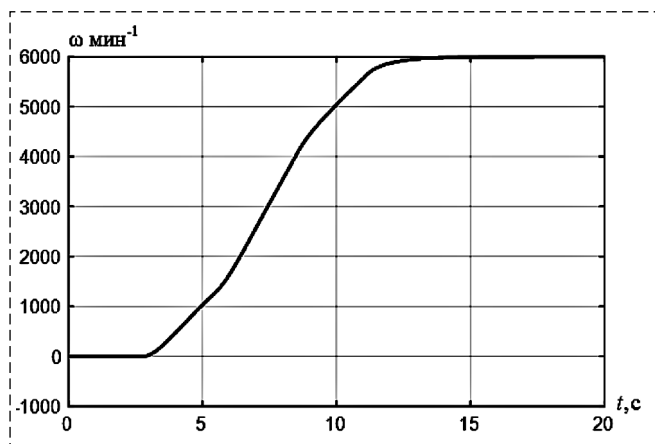


Рис. 5. График скорости вращения ДВС

эффективных моментов ДВС, электродвигателя и автомобиля.

Заключение

В статье изложены результаты синтеза законов управления гибридной силовой установкой на основе синергетического подхода. Также представлены графики моделирования синтезированной системы. По графикам видно достижение поставленных целей управления, таким образом, регулятор выполняет возложенные на него задачи. Полученные результаты позволяют решить важную прикладную проблему управления гибридной силовой установкой, распространенную в различных областях современной техники.

Список литературы

1. Луканин В. Н., Морозов К. А., Ханиян А. С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1. Теория рабочих процессов. М.: Высш. шк., 2005. 400 с.
2. Колчин А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 496 с.

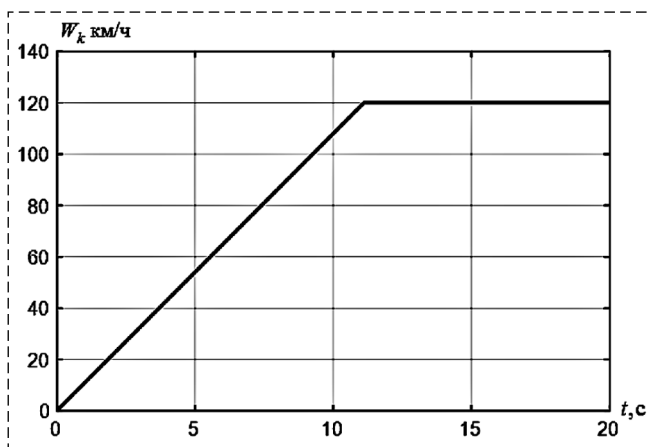


Рис. 6. График скорости движения колес автомобиля

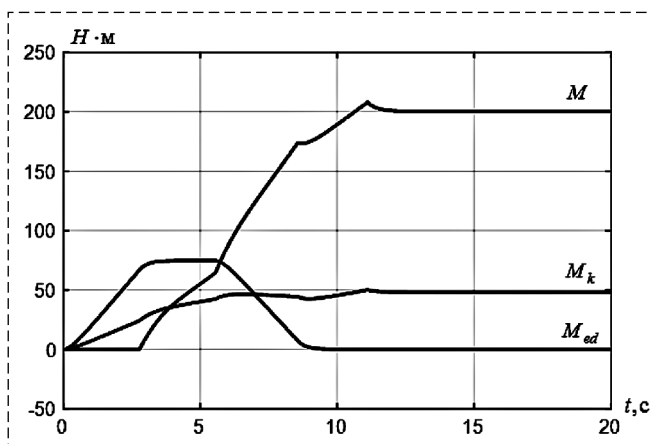


Рис. 7. График эффективных моментов ДВС, электродвигателя и колес автомобиля

3. Вырубов Д. Н., Иващенко Н. А., Ивин В. И. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
4. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. N. Y.: McGraw—Hill International Editions, 1988. 930 с.
5. Пятибратов Г. Я., Барыльник Д. В. Моделирование электромеханических систем. Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013. 103 с.
6. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ГОУВПО, 2008. 298 с.
7. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
8. Баженов О. В., Смирнов О. П., Сериков С. А. и др. Гибридные автомобили. Харьков: ХНАДУ, 2008. 327 с.
9. Сериков С. А. Синтез системы управления силовой установкой гибридного автомобиля // Вестник ХНАДУ. 2007. Вып. 36.
10. Герасимов Д. Н., Джавахериан Х., Ефимов Д. В., Никифоров В. О. Инжекторный двигатель как объект управления // Системы управления движущимися объектами. Известия РАН. 2010. № 5. С. 135—147.
11. Qiang S., Chao J. Robust Speed Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Sliding Mode Control // Energy Procedia. 2016. N. 88. P. 867—873.
12. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза М.: Едиториал УРСС, КомКнига, 2012. 240 с.
13. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

Synergetic Control System of Hybrid Power Plant

A. A. Kolesnikov, ankolesnikov@sfedu.ru, D. S. Kaliy, kaliy.d@yandex.ru,
I. A. Radionov, radionovivan@sfedu.ru, O. I. Yakimenko, iakimenko_olga@mail.ru,
Institute of computer technology and information security "Southern Federal University",
Taganrog, 347900, Russian Federation

Corresponding author: **Kolesnikov Anatoly A.**, D. Sc., Professor,
Institute of computer technology and information security "Southern Federal University",
Taganrog, 347900, Russian Federation, e-mail: ankolesnikov@sfedu.ru

Accepted on June 20, 2018

The problem of control of a hybrid power plant of a car consisting of an internal combustion engine, a synchronous electric motor with permanent magnets and a synchronous generator is considered. The formation of the control effect is carried out taking into account the connection of the above objects with each other with the help of planetary transmission. The mathematical models of the three listed engines are nonlinear with several control channels. In addition, the principle of the hybrid power plant requires the simultaneous operation of these engines and, accordingly, the construction of the necessary interrelated control actions. To synthesize the laws of vector control of a hybrid power plant, the method of analytical construction of aggregated regulators (ADAR) is used. Within the framework of this method, it is possible to work with a complete nonlinear control object model. Unlike the traditional approach of constructing a separate stabilizing control for each control channel, this method uses co-control over all variables to transfer the object to the desired state. In this case, for a number of variants of control algorithms, the communication between the control channels is carried out not indirectly, through the control object, but directly formed in the regulator. In addition, the control law takes into account unknown external disturbances, which were compensated using the principle of integral adaptation. In this paper, one of the modes of operation of a hybrid power plant is shown during the acceleration of the car. First, only the electric motor works, as the car accelerates, the internal combustion engine is connected, and at high speeds only the internal combustion engine works. This mode of operation of the hybrid power plant allows using both engines in the most convenient range of angular speeds, which leads to an economical fuel consumption and a charge of the storage batteries. In addition, the second electric motor operates in the generator mode and transfers a part of the mechanical moment to recharge the batteries.

Keywords: synergetic approach, synthesis of the regulator, hybrid power plant, internal combustion engine, electric motor, generator

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-08-00924 A).

For citation:

Kolesnikov A. A., Kaliy D. S., Radionov I. A., Yakimenko O. I. Synergetic Control System of Hybrid Power Plant, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 627–632.

DOI: 10.17587/mau.19.627-632

References

1. Lukanin V. N., Morozov K. A., Haniyan A. S. et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* (Internal combustion engines), *Kn. 1. Teoriya rabochih processov* (Workflow theory), Moscow, Vish. shk., 2005, 400 p. (in Russian).
2. Kolchin A. I. *Raschet avtomobilnih i traktornih dvigateley* (Computation of automobile and tractor engines), Moscow, Vish. shk., 2003, 496 p. (in Russian).
3. Virubov D. N., Ivashenko N. A., Ivin V. I. et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevih i kombinirovannih dvigatelei* (Internal combustion engines. Theory of reciprocating and combined engines), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 372 p. (in Russian).
4. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*, N. Y., McGraw—Hill International Editions, 1988, 930 c.
5. Pyatibratov G. Ya., Barilnik D. V. *Modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem* (Modeling of electromechanical systems), Novocherkassk, YURGPU, 2013. 103 p. (in Russian).
6. Vinogradov A. B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* (Vector control of AC electric drives), Ivanovo, GOUVPO, 2008, 298 p. (in Russian).
7. Klyuchev V. I. *Teoriya elektroprivoda* (Theory of electric drive), Moscow, Energoatomizdat, 2001, 704 p. (in Russian).
8. Bajenov O. V., Smirnov O. P., Serikov S. A. et al. *Gibridnie avtomobili* (Hybrid cars), Har'kov, HNADU, 2008, 327 p.
9. Serikov S. A. *Sintez sistemi upravleniya silovoy ustanovkoy gibridnogo avtomobilya* (Synthesis of the power plant control system of a hybrid car), *Vestnik HNADU*, 2007, vol. 36. (in Russian).
10. Gerasimov D. N., Djavaherian H., Efimov D. V., Nikiforov V. O. *Injektivnyy dvigatel' kak ob'ekt upravleniya* (Injector engine as a control object), *Sistemy upravleniya dvizhimi ob'ektami*, *Izvestiya RAN*, 2010, no. 5, pp. 135–147 (in Russian).
11. Qiang S., Chao J. Robust Speed Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Sliding Mode Control, *Energy Procedia*, 2016, no. 88, pp. 867–873.
12. Kolesnikov A. A. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhimi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza* (Synergetic methods for control complex systems: the theory of system synthesis), Moscow, Editorial URSS / KomKniga, 2012, 240 p. (in Russian).
13. Kolesnikov A. A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* (Synergetic Theory of control), Moscow, Energoatomizdat, 1994, 344 p. (in Russian).