

# СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ПУСКА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТОКА

К.Т.Н. Малеев Р.А., Шматков Ю.М., Холодов А.А.  
Московский политехнический университет, Москва, Россия  
eope@mospolytech.ru

Рассматривается применение емкостных накопителей энергии (НЭ) в системах электростартерного пуска (СЭП) для автомобильных ДВС, когда вместо штатной аккумуляторной батареи (АБ) применяется АБ меньшей емкости, а в оставшейся части объема АБ размещается НЭ. В этом случае при высоких удельных показателях НЭ может быть повышена надежность пуска при том же суммарном объеме и массе СЭП в условиях низких температур. В статье представлена методика определения параметров параллельно включенных АБ и НЭ для СЭП, в случае, когда заданы тип ДВС и его основные параметры, а также тип стартерного электродвигателя (СЭ) и его характеристики. Проведенные теоретические исследования позволили получить зависимость требуемой механической энергии для пуска ДВС от величины емкости НЭ в результате чего определяется требуемая емкость НЭ и его внутреннее сопротивление, начальная энергия НЭ, а также необходимые объем и масса АБ. Объем и масса АБ могут быть определены из справочной литературы или по известным методикам по удельным энергиям АБ по объему и массе. Если соотношение суммарного объема АБ и НЭ к объему АБ меньше единицы, то при данной пусковой частоте вращения применение НЭ целесообразно, вследствие уменьшения суммарного объема СЭП. Производятся аналогичные расчеты при других значениях средней пусковой частоты вращения. Оптимальными будут такие параметры АБ и НЭ, при которых суммарный объем будет минимальным. Были проведены расчеты параметров СЭП с НЭ и АБ для автомобильного двигателя ВАЗ с моторным маслом М6<sub>з</sub>/10Г<sub>1</sub> при температуре -20°C со стартером 35.3708 и передаточным числом редуктора привода 11,62. Результаты расчетов показывают, что при удельной энергии НЭ 1 Дж/см<sup>3</sup> при всех пусковых частотах вращения применение НЭ не позволяет уменьшить суммарный объем НЭ и АБ по сравнению с объемом АБ, требуемой для прокручивания вала ДВС с данной пусковой частотой.

**Ключевые слова:** емкостный накопитель энергии, аккумуляторная батарея, двигатель внутреннего сгорания, механическая энергия.

## Введение

Система пуска должна обеспечивать вращение коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с пусковой частотой, при которой создаются условия для воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси в цилиндрах. Так система пуска определяется видом используемой энергии и конструкцией основного пускового устройства (стартера) [1].

На автомобильных двигателях требованиям надежного пуска, необходимого быстродействия, удобства управления и обслуживания, минимальной массы, размеров и стоимости удовлетворяет система электростартерного пуска (СЭП) [2].

В применяемых в настоящее время СЭП источником энергии является аккумуляторная батарея (АБ). АБ в традиционной СЭП имеет большую относительную массу и в наиболь-

шей степени подвержена влиянию эксплуатационных факторов. На производство АБ расходуется дефицитный и дорогостоящий свинец [1]. Поэтому усилия разработчиков СЭП прежде всего должны быть направлены на снижение массы АБ как за счет оптимизации их конструкции, так и за счет применения в СЭП других источников электроэнергии.

Одним из возможных путей улучшения габаритно-массовых показателей СЭП автомобильных двигателей является применение в них в качестве промежуточного источника питания электростартера емкостных накопителей энергии (НЭ). При обоснованном выборе схемных решений, оптимизации конструкций и правильном согласовании характеристик АБ (как источника энергии для заряда НЭ) НЭ и стартерного электродвигателя СЭП с НЭ по своим габаритно-массовым, мощностным и энергетическим

показателям могут конкурировать с традиционными СЭП с АБ [3]. Особенно важно обеспечить правильное согласование характеристик элементов СЭП с НЭ, когда АБ используется не только для заряда НЭ до начала пуска двигателя и в промежутках между отдельными попытками пуска, но и для совместной работы с НЭ при питании электростартера.

АБ занимают одно из первых мест среди других накопителей энергии по удельной энергии (более 200 Дж/см<sup>3</sup>), однако имеют сравнительно большое внутреннее сопротивление [1]. Из-за разного увеличения внутреннего сопротивления и уменьшения отдачи энергии (до 5–10 %) как с показателем температуры, так и с увеличением силы разрядного тока на автомобилях используют стартерные АБ с энергией в 20-ти часовом режиме разряда, в сотни раз превышающей энергию, необходимую для осуществления пуска ДВС [2].

### Цель исследования

Целью исследования является рассмотрение системы электростартерного пуска ДВС с альтернативными источниками тока.

### Материалы, методы исследования и их обсуждение

Анализ различных накопителей энергии показал, что благодаря малому внутреннему сопротивлению при сравнительно небольшой удельной энергии по удельной мощности высокими показателями обладают емкостные накопители. Они способны быстро накапливать и отдавать накопленную энергию. Время заряда и разряда НЭ определяется, в основном, параметрами соответственно зарядной цепи и потребителя электроэнергии [3].

Результаты экспериментальных исследований [3] показывают, что подключение параллельно АБ НЭ позволяет повысить надежность пуска ДВС при отрицательных температурах, увеличивая среднюю частоту прокручивания вала ДВС. В данной статье представлена методика определения параметров АБ и НЭ для СЭП серийно выпускаемых автотракторных ДВС. В этом случае тип (марка) ДВС и его основные параметры, а также тип стартерного электродвигателя (СЭ) и его характеристики заданы. Наибольший практический интерес представляет случай, когда вместо штатной АБ применяется АБ меньшей емкости, а в оставшейся части объема АБ размещается НЭ. В

этом случае при высоких удельных показателях НЭ может быть повышена надежность пуска при таком же суммарном объеме и массе СЭП.

Расчет параметров СЭП следует производить в следующей последовательности. Задаваясь пусковой частотой вращения  $n_{cp}$  по пусковой характеристике, определяется время пуска  $t_n$ , а по механической характеристике – средний момент сопротивления. Находим полезный вращающий момент СЭ, соответствующий:

$$M_2 = \frac{M_c}{u \cdot \eta},$$

где  $u$  – передаточное число редуктора привода СЭ к ДВС;  $\eta$  – КПД передачи от СЭ к ДВС ( $\eta = 0,86$ ).

Используя рабочие характеристики СЭ по рабочим характеристикам для момента определяем требуемую силу тока СЭ  $I_a$ , частоту вращения якоря  $n_{a0}$ , напряжение на клеммах СЭ  $U_{ст0}$ . По известному значению активного сопротивления СЭ  $R_{ст}$  находим ЭДС в обмотках якоря:

$$E_{a0} = U_{ст0} - I_a \cdot R_{ст}.$$

Частота вращения якоря СЭ:

$$n_a = n_{cp} \cdot u.$$

Для обеспечения вращения якоря СЭ с частотой  $n_a$  в обмотках якоря СЭ должна наводиться ЭДС:

$$E_a = \frac{n_a \cdot E_{a0}}{n_{a0}}.$$

Для обеспечения вращения вала ДВС с пусковой частотой  $n_{cp}$  при наличии только одной АБ она должна иметь внутреннее сопротивление:

$$R_0 = \frac{U_n - I_a \cdot R_{ст} - I_a \cdot R_{np} - E_a}{I_a}, \quad (1)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение АБ и НЭ;  $R_{ст}$  – внутреннее сопротивление СЭ, включающее в себя сопротивление обмоток якоря и возбуждения, а также сопротивление коллекторно-щеточного узла;  $R_{np}$  – активное сопротивление стартерной цепи (провод и «масса»).

При параллельном включении АБ и НЭ внутреннее сопротивление АБ должно удовлетворять условию:

$$R_0 > \frac{U_n - I_a \cdot R_{ст} - I_a \cdot R_{np} - E_a}{I_a}. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов можно использовать параметры серийно выпускаемых АБ, т.е. внутреннее сопротивление АБ  $R_0$  при заданной расчетной температуре пуска можно брать из справочной литературы или использовать для его расчета известные методики [2]. Расчет целесообразно проводить для нескольких значений  $R_0$ , удовлетворяющих условию (2).

Результаты теоретических исследований [1] позволили получить зависимость требуемой механической энергии  $W_{мех}$  от величины емкости НЭ:

$$W_{мех} = [U_n - I_a \cdot (R_0 + R_{ст} + R_{пр})] \times \\ \times I_a \cdot t_n + I_a^2 \cdot R_0^2 \cdot C \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_1}} \right),$$

где  $\tau_1 = \tau_{нэ} + C \cdot R_0$ .

Задавая различные значения емкости НЭ при известной постоянной времени НЭ, строим зависимость  $W_{мех} = f(C)$ .

Для обеспечения прокручивания ДВС с заданной пусковой частотой вращения  $n_{cp}$  требуется механическая энергия [4, 5]:

$$W'_{мех} = \frac{W_n}{\eta_{эм} \cdot \eta_p} = \frac{P_n \cdot t_n}{\eta_{эм} \cdot \eta_p} = \frac{\pi \cdot M_c \cdot n_{cp} \cdot t_n}{\eta_{эм} \cdot \eta_p \cdot 30},$$

где  $\eta_{эм}$  – электромагнитный КПД СЭ;  $W_n = P_n \cdot t_n$  – полезная механическая энергия;  $P_n = \pi M_c \cdot n_{cp} / 30$  – пусковая мощность сопротивления на валу ДВС.

Электромагнитный КПД  $\eta_{эм}$  может быть определен по выражению:

$$\eta_{эм} = \frac{P_2}{P},$$

где  $P_2 = \pi n_a \cdot M_2 / 30$  – полезная мощность СЭ;  $P = E_a \cdot I_a$  – электромагнитная мощность СЭ.

Зная требуемую механическую энергию  $W'_{мех}$  по зависимости  $W_{мех} = f(C)$ , определяем требуемую емкость НЭ.

При заданном типе НЭ, т.е. известном значении постоянной времени НЭ  $\tau_{нэ}$  определяем требуемое сопротивление НЭ:

$$R_{нэ} = \frac{\tau_{нэ}}{C}.$$

Начальная энергия НЭ:

$$W_{нэ0} = \frac{C \cdot U_n^2}{2}.$$

Требуемые объем НЭ и масса НЭ:

$$V_{нэ} = \frac{W_{нэ0}}{W_{нэV}}, \quad m_{нэ} = \frac{W_{нэ0}}{W_{нэм}},$$

где  $W_{нэV} = W_{нэ0} / V_{нэ}$  – удельная энергия НЭ по объему;  $W_{нэм} = W_{нэ0} / m_{нэ}$  – удельная энергия НЭ по массе.

Объем и масса АБ могут быть определены из справочной литературы или по известным методикам [4, 5] по удельным энергиям АБ по объему  $W_{АБV}$  и массе  $W_{АБm}$ .

Суммарный объем АБ и НЭ:

$$V_{\Sigma} = V_{нэ} + V_{АБ}.$$

Отношение суммарного объема  $V_{\Sigma}$  к объему АБ  $V_{АБ}^*$ , требуемой для обеспечения прокручивания вала ДВС с заданной частотой:

$$\frac{V_{\Sigma}}{V_{АБ}^*} = \frac{V_{нэ} + V_{АБ}}{V_{АБ}^*}.$$

Объем  $V_{АБ}^*$  и номинальная емкость требуемой АБ могут быть определены исходя из требуемого внутреннего сопротивления АБ  $R_0$  (1) по известным методикам [2].

Далее строится зависимость суммарного объема  $V_{\Sigma}$  от внутреннего сопротивления АБ  $R_0$ , из которой могут быть определены оптимальные параметры СЭП по минимуму функции  $V_{\Sigma} = f(R_0)$ .

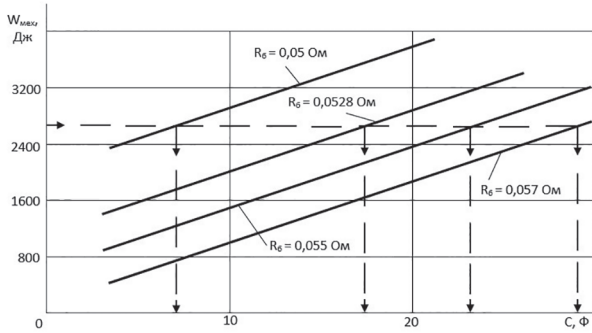
Если отношение  $V_{\Sigma} / V_{АБ}^* < 1$ , то при данной пусковой частоте вращения  $n_{cp}$  применение НЭ целесообразно, вследствие уменьшения суммарного объема СЭП.

Далее следует произвести аналогичные расчеты, задавая другими значениями средней пусковой частоты вращения  $n_{cp}$  и построить зависимость  $V_{\Sigma} = f(n_{cp})$ .

Оптимальными будут такие параметры АБ и НЭ, при которых суммарный объем  $V_{\Sigma}$  будет минимальным.

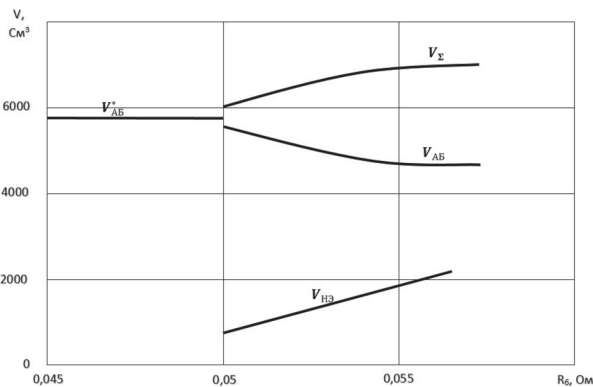
Границей целесообразности применения НЭ является случай, когда суммарный объем АБ и НЭ  $V_{\Sigma}$  равен объему  $V_{АБ}^*$ .

Для примера был проведен расчет параметров СЭП с НЭ и АБ для автомобильного ДВС ВАЗ-21081 с моторным маслом М63/10Г<sub>1</sub> при температуре 20 °С, со стартером 35,3708 с передаточным числом редуктора привода и  $u = 11,62$ . При расчетах не учитывалось сопротивление стартерной сети ( $R_{пр} = 0$ ), постоянная времени НЭ была принята равной единице ( $\tau_{нэ} = 1$ ).



**Рис. 1.** Зависимости  $W_{\text{мех}} = f(C)$  при различных  $R_{\text{в}}$  и  $n_{\text{ср}} = 40 \text{ мин}^{-1}$

На рис. 1 представлена зависимость механической энергии  $W_{\text{мех}}$  от емкости НЭ  $C$  при  $n_{\text{ср}} = 40 \text{ мин}^{-1}$  и различных значениях внутреннего сопротивления АБ  $R_{\text{в}}$ . При уменьшении емкости АБ, т.е. увеличении ее внутреннего сопротивления  $R_{\text{в}}$ , требуемая емкость НЭ  $C$  должна быть больше для обеспечения прокручивания вала ДВС с заданной средней пусковой частотой вращения  $n_{\text{ср}}$ .



**Рис. 2.** Зависимости объемов источников энергии от  $R_{\text{в}}$  при  $n_{\text{ср}} = 40 \text{ мин}^{-1}$

На рис. 2 представлены зависимость объемов АБ  $V_{\text{АБ}}$  и НЭ  $V_{\text{НЭ}}$ , а также суммарного объема  $V_{\text{ср}} = V_{\text{АБ}} + V_{\text{НЭ}}$  от внутреннего сопротивления АБ  $R_{\text{в}}$  при  $n_{\text{ср}} = 40 \text{ мин}^{-1}$ . При расчетах объем АБ определялся исходя из среднестатистических данных по широко применяемому ряду АБ (6СТ-45, 6СТ-60, 6СТ-75), для которых:

$$V_{\text{АБ}} = 205,7 \cdot C_{20},$$

где  $C_{20}$  – номинальная емкость АБ в А.ч.

Объем НЭ  $V_{\text{НЭ}}$  определялся по удельной энергии НЭ  $W_{\text{НЭв}} = 1 \text{ Дж/см}^3$ .

### Выводы

1. Результаты расчетов показывают, что при удельной энергии НЭ  $W_{\text{НЭв}} = 1 \text{ Дж/см}^3$  при всех пусковых частотах вращения применения НЭ не позволяет уменьшить суммарный объем НЭ и АБ  $V_{\text{ср}}$  по сравнению с объемом АБ  $V_{\text{АБ}}^*$ , требуемой для прокручивания вала ДВС с данной пусковой частотой, т.е.  $V_{\text{ср}}/V_{\text{АБ}}^* > 1$ . Таким образом, при данной удельной энергии НЭ применение параллельного включения АБ и НЭ не позволяет уменьшить габариты СЭП.

2. Данная методика расчета может быть использована при разработке СЭП с альтернативными источниками тока для различных типов ДВС и в условиях низких температур.

### Литература

1. Коротков В.И., Малеев Р.А., Мычка Н.В., Гулин А.Н. Емкостные накопители энергии в системе электростартерного пуска автомобильных двигателей. Известия МГТУ «МАМИ». 2015. № 4(26). Т. 1. С. 26–31.
2. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
3. Малеев Р.А., Гулин А.Н., Мычка Н.В., Кузнецова Ю.А. Система электростартерного пуска с различными источниками тока. Известия МГТУ «МАМИ». 2015. № 4(26). Т. 1. С. 51–55.
4. Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Подбор системы электростартерного пуска с емкостным накопителем энергии и аккумуляторной батареей. Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 2(16). Т. 1. С. 125–129.
5. Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Методика расчета системы электростартерного пуска с аккумуляторной батареей и емкостным накопителем энергии. Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 2(16). Т. 1. С. 129–133.

### References

1. Korotkov V.I., Maleev R.A., Mychka N.V., Gulina A.N. Capacitive energy storage devices in the system of electric starting of the automobile engines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2015. No 4(26). Vol. 1, pp. 26–31 (in Russ.).
2. Kvayt S.M., Mendelevich Ya.A., Chizhkov Yu.P. *Puskovye kachestva i sistemy puska avtotraktornykh dvigateley* [Starting qualities and the starting systems for automobile and

- tractor engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 256 p.
3. Maleev R.A., Gulin A.N., Mychka N.V., Kuznetsova Yu.A. The electric starting system with various current sources. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2015. No 4(26). Vol. 1, pp. 51–55 (in Russ.).
  4. Maleev R.A., Shmatkov Yu.M. Selection of the electric starting system with a capacitive energy storage device and a battery. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013. No 2(16). Vol. 1, pp. 125–129 (in Russ.).
  5. Maleev R.A., Shmatkov Yu.M. Method for calculating the electric starting system with a battery and a capacitive energy storage device. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013. No 2(16). Vol. 1, pp. 129–133 (in Russ.).

## THE ELECTRIC STARTING SYSTEMS OF AUTOMOBILE INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH ALTERNATIVE SOURCES OF CURRENT

Ph.D. R.A. Maleev, Yu.M. Shmatkov, A.A. Kholodov  
 Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia  
 eope@mospolytech.ru

*The application of capacitive energy storage devices in the electric starting systems for automobile internal combustion engines is considered, when instead of a standard battery, a battery of a smaller capacity is used, and in the remainder of the standard battery volume, the energy storage device is mounted. In this case, at the high specific indicators of the energy storage device, the reliability of the engine start can be increased with the same total volume and mass of the electric starting systems at low temperatures. The paper presents a methodology for a determination the parameters of the battery and the energy storage device which are connected in parallel for the electric starting systems, in the case when the type of internal combustion engine and its main parameters are specified, as well as the type of the starter motor and its characteristics. The conducted theoretical investigations made it possible to obtain the dependence of the required mechanical energy for starting the internal combustion engine from the value of the capacity of the energy storage device, as a result of which the required capacity of the energy storage device and its internal resistance, its initial energy, as well as its necessary volume and mass are determined. The volume and mass of battery can be determined from the reference literature or under certain methods for the specific energy of battery by volume and mass. If the ratio of the total volume of the battery and the energy storage device to the volume of the battery is less than unity, then at the given starting frequency of rotation, the usage of the energy storage device is reasonable, due to the reduction of the total volume of the electric starting systems. Similar calculations are conducted for other values of the average starting frequency of rotation. The optimal parameters of the battery and the energy storage device are in which the total volume will be minimal. The parameters of the electric starting systems with the energy storage device and the battery for the VAZ automobile engine with M6<sub>2</sub>/10G<sub>1</sub> engine oil were calculated at a temperature of -20°C with a starter 35.3708 and the gear ratio of the drive gear 11,62. The results of the calculations are shown that for a specific energy of the energy storage device 1 J/cm<sup>3</sup> at all starting rotational speeds, the usage of the energy storage device does not allow to reduce the total volume of the energy storage device and the battery in comparison with the volume of the battery required for scrolling the internal combustion engine shaft with this starting frequency.*

**Keywords:** capacitive energy storage device, battery, internal combustion engine, mechanical energy.