

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ПУСКА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

К.Т.Н. Малеев Р.А., к.ф.-м.н. Зуев С.М., к.т.н. Лавриков А.А., Гребенчиков Н.П.  
Московский политехнический университет, Москва, Россия  
eope@mospolytech.ru

*В статье приводятся данные по исследованию режимов работы емкостных накопителей энергии (НЭ) в системах пуска современного автомобильного двигателя. Представлены экспериментальные зависимости основных параметров систем электростартерного пуска (СЭП) с использованием НЭ. При сравнительном анализе альтернативных накопителей энергии было выявлено, что лучшими показателями по удельной мощности обладают НЭ, что достигается благодаря меньшему внутреннему сопротивлению. Накопленную энергию НЭ способны быстро отдавать и накапливать. Время разряда и заряда определяется потребителями электроэнергии и параметрами зарядной цепи НЭ. Проведены исследования НЭ в СЭП для автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), когда вместо штатной аккумуляторной батареи (АБ) применяется АБ меньшей емкости, а в оставшейся части объема АБ размещается НЭ. При высоких удельных показателях НЭ может быть повышена надежность пуска при том же суммарном объеме и массе СЭП в условиях низких температур. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить зависимости мгновенных и средних параметров СЭП от времени прокручивания двигателя, в результате чего определяются требуемая емкость НЭ и его внутреннее сопротивление, начальная энергия НЭ, а также необходимые объем и масса НЭ. Объем и масса АБ могут быть определены из справочной литературы или по известным методикам по удельным энергиям АБ по объему и массе. На экспериментальных зависимостях было показано, что время прикручивания коленчатого вала, число рабочих ходов и угол поворота коленчатого вала до полной остановки  $n_{рх}$  зависят от емкости и напряжения заряда НЭ. Исследования проводились в лаборатории холодного пуска ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» совместно с кафедрой «Электрооборудование и промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», где была проведена экспериментальная оценка возможности пуска автомобильных бензиновых двигателей при низких температурах СЭП с НЭ высокого напряжения (конденсаторы с напряжением 200–290 В) и низковольтных НЭ с напряжением 12–16 В.*

**Ключевые слова:** емкостный накопитель энергии, аккумуляторная батарея, двигатель внутреннего сгорания, системы электростартерного пуска, время прокручивания коленчатого вала.

## Введение

При запуске двигателя автомобиля система электростартерного пуска (СЭП) должна обеспечивать вращение коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с пусковой частотой, при которой создаются условия для воспламенения и сгорания топливовоздушной смеси в цилиндрах. Вид используемой энергии и конструкция основного пускового устройства определяют систему электростартерного пуска.

Система электростартерного пуска должна удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать надежный пуск автомобильных дви-

гателей и необходимость их быстрого действия, иметь минимальную массу, размер и стоимость, удобства управления и обслуживания.

В традиционной СЭП основным источником энергии является аккумуляторная батарея (АБ), которая имеет относительную большую массу и подвержена влиянию эксплуатационных факторов. Например, при низких температурах АБ становится практически не работоспособной. Стремление обеспечить работоспособность системы электростартерного пуска при низких температурах уже привело к тому, что на 1000 см<sup>3</sup> рабочего объема двигателя автомобиля приходится от 8 до 34 кг массы

СЭП, из которых 60–80 % составляет АБ, изготавливаемая из дефицитного свинца. Суммарная масса АБ и электростартера составляет 1–3 % от массы автомобиля. Доля стартера в массе автомобильного двигателя составляет 2–6 %.

Поэтому стремления разработчиков направлены на снижение массы АБ как за счет оптимизации конструкции, так и за счет применения в СЭП других источников электроэнергии.

Возможным путем для улучшения массогабаритных показателей СЭП автомобильных двигателей является применение в них в качестве промежуточного источника питания электростартера емкостных накопителей энергии (НЭ). При правильном согласовании характеристик АБ (как источника энергии для заряда НЭ), оптимизации конструкции и грамотном выборе схемных решений, НЭ и стартерного электродвигателя СЭП с НЭ по своим габаритно-массовым, мощностным и энергетическим показателям могут конкурировать с традиционными СЭП с АБ. При этом также необходимо обеспечить правильное согласование характеристик элементов СЭП с НЭ. Это важно 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.

### **Цель исследований**

Исследование режимов работы емкостных накопителей энергии в системах пуска современного автомобильного двигателя.

### **Средства проведения исследований**

На современных автотранспортных средствах основное применение находят СЭП, в которых источником энергии являются стартерные свинцовые АБ, обеспечивают надежный пуск ДВС без предварительного подогрева до температур  $-(20-30)^\circ\text{C}$ . При температурах ниже  $-(30-35)^\circ\text{C}$  они становятся практически не работоспособными. Это связано со значительным увеличением внутреннего сопротивления, снижением вызываемой мощности АБ, а также их отдачи по емкости и энергии с понижением температуры [1].

АБ занимают одно из первых мест среди других накопителей энергии (более

200 Дж/см<sup>3</sup>), однако имеют сравнительно большое внутреннее сопротивление [2]. Из-за резкого увеличения внутреннего сопротивления и уменьшения отдачи энергии (до 5–10 %) как с понижением температуры, так и с увлечением 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 [3].

Анализ различных накопителей энергии показал [4], что при сравнительно небольшой удельной энергии по удельной мощности высокими показателями обладают НЭ. Благодаря значительно меньшему внутреннему сопротивлению НЭ способны быстро накапливать и отдавать накопленную энергию. Время заряда и разряда НЭ в основном определяется параметрами соответственно зарядной цепи и потребители энергии, т.е. стартерного электродвигателя соответственно [5].

Указанные преимущества (малое внутреннее сопротивление и высокая удельная мощность) позволяют использовать их в СЭП в качестве промежуточных источников тока. Накопитель энергии размещают между АБ и электростартером. Во время работы автомобильного двигателя НЭ вместе с АБ подзарядается от генераторной установки, что обеспечивает возможность пуска ДВС после непродолжительной остановки. Перед пуском холодного двигателя батареи НЭ в течение 30–90 с заряжаются от АБ (или другого источника тока), а затем в течение 1–5 с разряжаются на электростартер, вращающий коленчатый вал ДВС.

Выделенная энергия НЭ за короткий промежуток времени позволяет электростартеру развить значительную мощность, вращать коленчатый вал с высокой пусковой частотой и тем самым повысить надежность пуска. Так как АБ при этом разряжается на НЭ в течение более длительного времени по сравнению с продолжительностью процесса пуска, ее номинальную емкость можно существенно уменьшить [6].

В настоящее время прорабатывается возможность использования в СЭП НЭ низкого (12 В, 24 В) и высокого напряжения (до 300 В) [7].

Преимущества СЭП низкого напряжения – полная электробезопасность, лучшие согласование с существующей низковольтной систе-

мой электрооборудования и, как следствие, возможность более раннего внедрение ее не только на серийно выпускаемых и проектируемых транспортных средствах, и стационарных двигателях, но и уже находящихся в эксплуатации [8].

Преимущества конденсаторных СЭП высокого напряжения – это близкие к нулю внутренние сопротивления, небольшой величины сила тока стартера, что позволяет экономить медь стартерного провода и снизить потери мощности стартерной сети, а также возможность использования для пуска ДВС энергии электрических сетей [9]. В слаботочных цепях высоковольтных СЭП можно широко применить современные средства микроэлектроники [10]. Однако внедрение таких систем связано с заменой традиционного низковольтного электростартера на высоковольтный, создание системы преобразования низкого напряжения АБ в высокое напряжение и необходимости разработки мероприятий по обеспечению электробезопасности [11].

В лаборатории холодного пуска ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» совместно с кафедрой «Электрооборудование и промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» была проведена экспериментальная оценка возможности пуска автомобильных бензиновых двигателей при низких температурах СЭП с НЭ высоко-

го напряжения (конденсаторы с напряжением 200–290 В) и низковольтных НЭ с напряжением 12–16 В [12].

Программа испытаний включила прокручивание двигателя в интервале температур от 0 °С до –30 °С и пробные пуски при испытании электродвигателя от НЭ различной емкости. В качестве рабочего образца для данного типа исследований использовался рядный, 4-х цилиндровый двигатель, объемом 1294 см<sup>3</sup> и максимальной мощностью 64 л.с.

Энергия НЭ ограничена, поэтому после достижения максимального значения частота вращения коленчатого вала стартером  $n_{ст}$  уменьшается до нуля вследствие расходования накопленной при заряде энергия (рис. 1). При использовании в СЭП НЭ нет установившегося режима прокручивания коленчатого вала двигателя с относительно постоянной частотой вращения. На рис. 1 показано изменения мгновенных и средних значений частоты вращения коленчатого вала  $n$  и  $n_{ср}$ , вращающих моментов стартера  $M_{ст}^*$  и  $M_{ст.ср}^*$ , а также напряжение на НЭ  $U_c$  в зависимости от времени прокручивания коленчатого вала  $t$ .

В начальный момент частота вращения коленчатого вала от НЭ, с запасенной энергией 5370 Дж (емкость батареи  $C_{НЭ} = 0,1277$  Ф, напряжением заряда  $U_{НЭ0} = 290$  В) быстро возрастает (0,3 с), после достижения максимума в течение примерно 1 с линейно уменьшается и в конце прокручивания резко снижается до 0. Стартер в начале прокручивания развивает

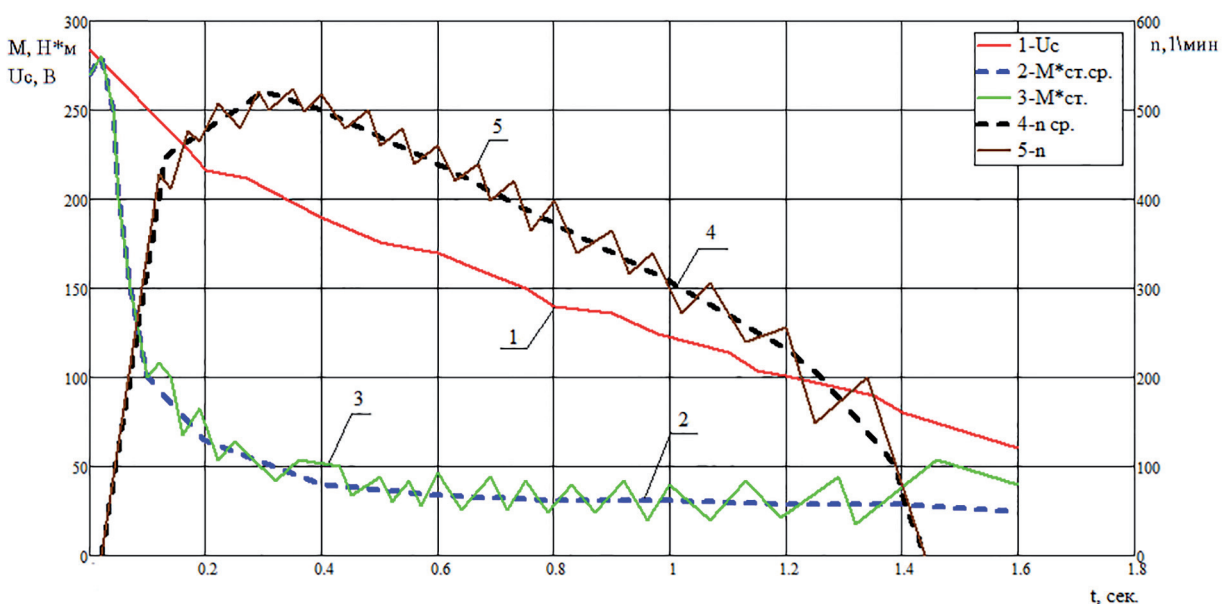


Рис. 1. Зависимость мгновенных и средних параметров СЭП от времени прокручивания двигателя

большой вращающий момент ( $M_{ст}^* = 280 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ), необходимый для преодоления момента сопротивления и динамического момента. Затем по мере прокручивания вследствие уменьшения вязкости масла в трущихся парах двигателя момент сопротивления вращению и вращающий момент стартера уменьшаются. Напряжение на зажимах НЭ  $U_{НЭ}$  быстрее уменьшается в начале прокручивания, когда выше момент сопротивления, вращающий момент и необходимая для обеспечения этого вращающего момента сила тока от НЭ.

Частота вращения коленчатого вала  $n$  и напряжение на зажимах НЭ  $U_{НЭ}$  снижаются линейно в конце процесса прокручивания, когда имеет место относительная стабилизация момента сопротивления, а следовательно, вращающегося момента стартера  $M_{ст.сп}^*$  и силы тока, потребляемого от НЭ.

Как показали испытания, мгновенные и средние значения частот вращения коленчатого вала, время прикручивания и число рабочих ходов  $N_{рх}$  (угол поворота коленчатого вала до полной остановки) зависят от емкости и напряжения заряда НЭ (рис. 2–5), то есть от запасенной в нем при заряде электрической энергии.

Длительность прокручивания ДВС СЭП с НЭ зависит также от температуры. Так, при наибольшей энергии конденсаторной батареи 5370 Дж понижение температуры от  $0^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$  приводит к снижению средней частоты вращения с 372 до 169  $\text{мин}^{-1}$ , количество рабочих ходов уменьшается с 24 до 4, время прокручивания с 2,32 до 0,67 сек. При накоплении НЭ энергии 2545 Дж со снижением температуры от  $0^\circ\text{C}$  до  $-30^\circ\text{C}$  средняя частота вращения коленчатого вала ДВС уменьшается с 270 до 56  $\text{мин}^{-1}$ , количество рабочих ходов с 9 до 1, а время прокручивания с 1,1 до 0,54 с.

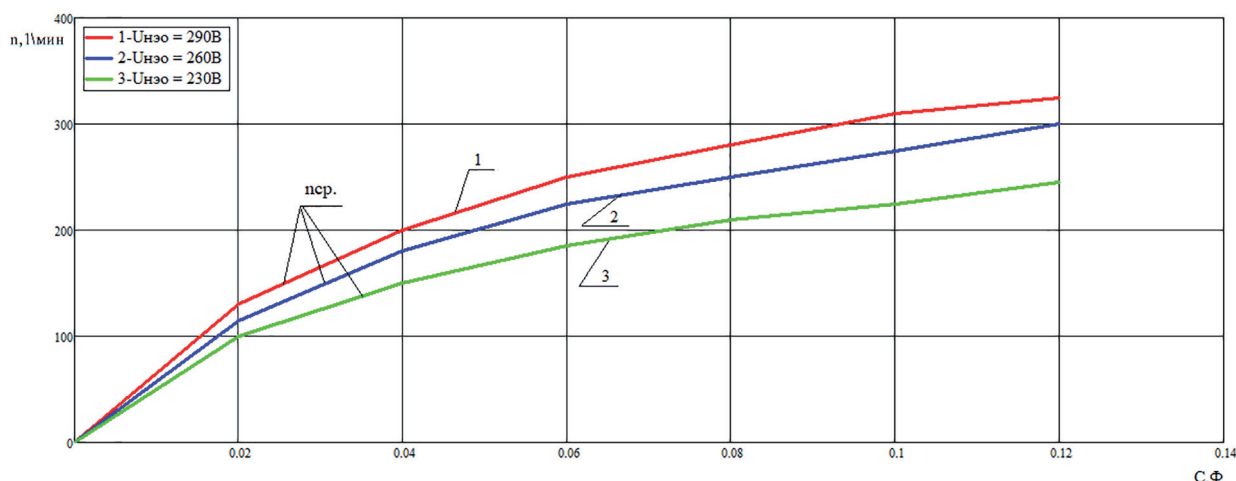


Рис. 2. Зависимость средней частоты вращения двигателя от величины емкости НЭ при различных начальных напряжениях НЭ

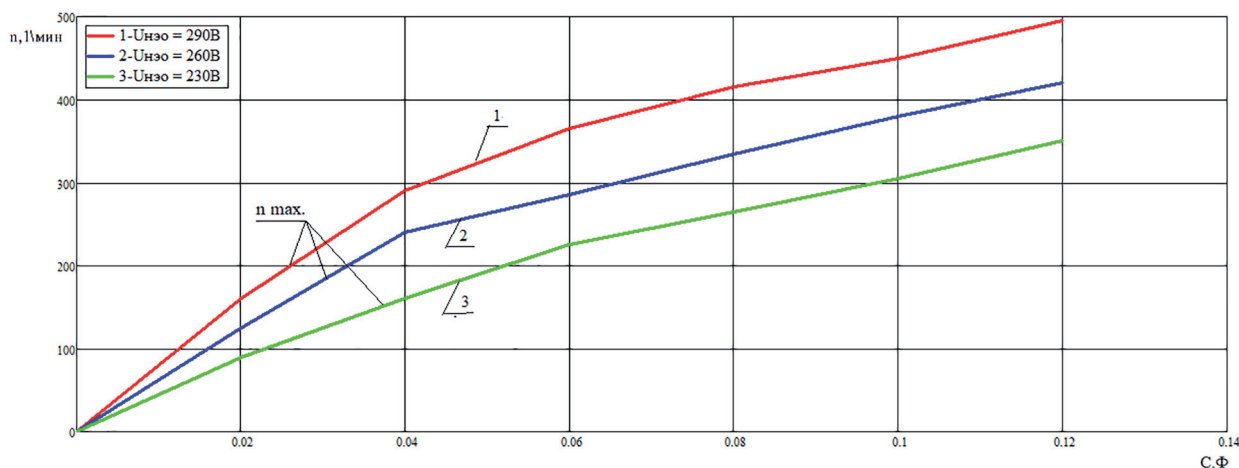


Рис. 3. Зависимость максимальной частоты вращения двигателя от величины емкости НЭ при различных начальных напряжениях НЭ

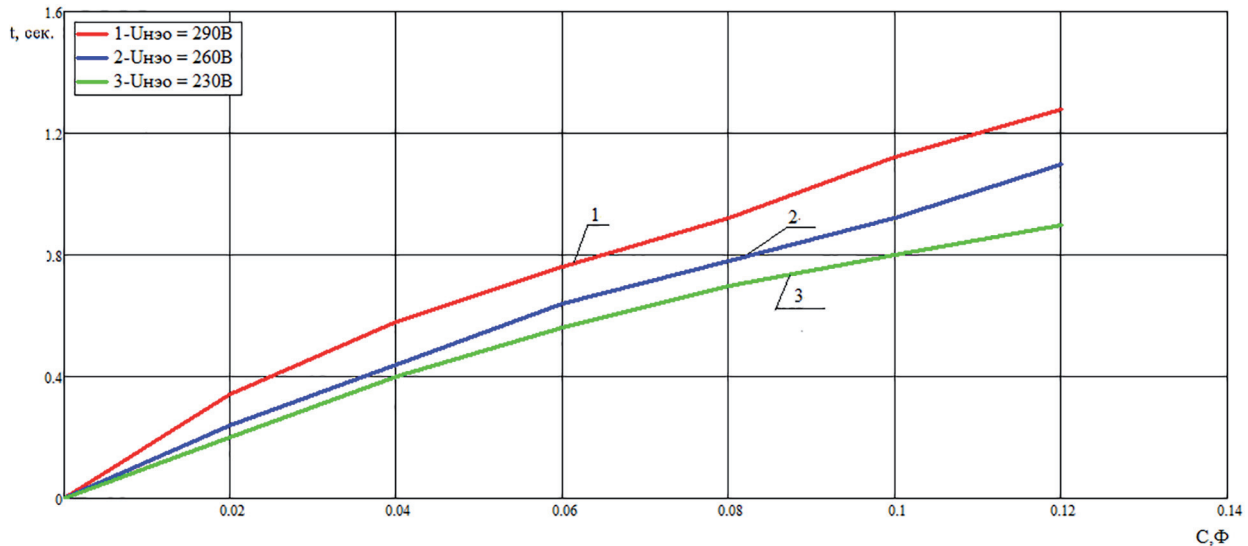


Рис. 4. Зависимость времени прокручивания от величины емкости НЭ при различных начальных напряжениях НЭ

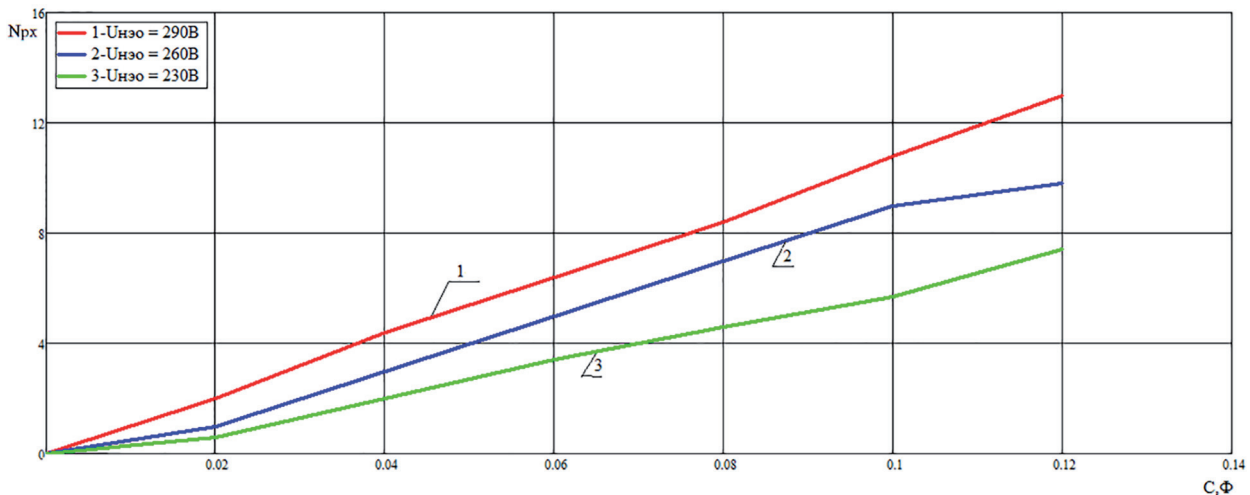


Рис. 5. Зависимость количества рабочих ходов двигателя от величины емкости НЭ при различных начальных напряжениях НЭ

Несмотря на различия в динамике процесса прокручивания коленчатого вала поршневых двигателей электростартерами при питании от АБ и НЭ, в обоих случаях механическую работу прокручивания коленчатого вала при каждой расчетной чистоте вращения следует определять по среднему значению момента сопротивления  $M_c$  на расчетных или экспериментальных зависимостях  $M_c = f(n_{cp})$  и по времени пуска  $\tau_n$  на экспериментальных зависимостях  $\tau_n = f(n_{cp})$ .

Сравнительную оценку СЭП с НЭ и СЭП с АБ, обеспечивающих заданные режимы вращения ДВС ( $n_{cp}$  и  $t_n$ ), можно проводить по параметрам НЭ и АБ, если в обоих СЭП используется один и тот же стартерный электродвигатель. Идентичность стартерного электродвигателя

в СЭП как с НЭ, так и с АБ будет обеспечена при наличии одной и той же характеристики электромагнитного вращающего момента  $M = f(I_a)$  и равенстве сопротивлений стартерного электродвигателя. Характеристика  $M = f(I_a)$  для стартерного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов будет одна и та же в СЭП с НЭ и с АБ, т.е. для обоих СЭП, при заданном номинальном напряжении  $U_n$  выбрана одинаковая частота вращения  $n_m$  в режиме максимальной электромагнитной мощности. При использовании стартерного электродвигателя частота вращения в режиме максимальной электромагнитной мощности для СЭП с НЭ ( $n_{мНЭ}$ ) и СЭП с АБ ( $n_{мАБ}$ ), обеспечивающих одинаковую эффективность прокручивания ДВС, отличаются.

При неизменной характеристике электромагнитного момента стартерный электродвигатель независимо от типа источника питания будет преодолевать средний момент сопротивления при том же рабочем токе якоря  $I_a$ .

### Выводы

В результате проведения исследований режимов работы НЭ были получены экспериментальные данные, которые будут использоваться при разработке СЭП с альтернативными источниками тока для различных типов ДВС в условиях низких температур, которые показали, что при достаточно высоких удельных энергиях применение НЭ позволяет повысить надежность пуска и улучшить технико-экономические показатели СЭП.

### 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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Акимов А.В., Варламов Д.О., Зуев С.М. Конструкция, описание работы и проведение диагностики системы электростартерного пуска современных транспортных средств. Учебное пособие. М.: Московский Политех, 2017. 52 с.
6. Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М. Высоковольтные системы пуска двигателей внутреннего сгорания. *Автомобильная промышленность*, 2016, № 10. С. 24–27.
7. Skvortsov A.A., Khortov V.P., Zuev S.M. High-voltage starting systems of combustion engines. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Volume 111, 2016, № 3, pp. 455–465.
8. Хортов В.П., Скворцов А.А., Зуев С.М., Ворожейкин В.В. Суперконденсаторные системы пуска ДВС. *Автомобильная промышленность*, 2016, № 12. С. 12–16.
9. Шматков Ю.М., Лавриков А.А. Исследование работы системы электростартерного пуска транспортных средств. Методические указания. М.: Московский Политех, 2017. 20 с.
10. Зуев С.М., Шматков Ю.М., Малеев Р.А., Хортов В.П., Лавриков А.А., Варламов Д.О. Электрооборудование и электроника автомобилей в основных терминах с их объяснением на русском и английском языках. Учебный справочник. М.: Московский Политех, 2017. 196 с.
11. Ермаков В.В., Малеев Р.А., Холодов А.А., Шматков Ю.М. Цифровой измеритель натяжения ремня газораспределительного механизма и генератора в автомобилях ВАЗ. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2018, № 2(36). Т. 1. С. 10–16.
12. Малеев Р.А., Шматков Ю.М., Холодов А.А. Системы электростартерного пуска автомобильных ДВС с альтернативными источниками топлива. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2018, № 1 (35). Т. 1. С. 33–38.

### References

1. Korotkov V.I., Maleev R.A., Mychka N.V., Gulin A.N. Capacitive energy storage in the electric starter system of automobile engines. *Izvestiya MGTU «MAМИ»*. 2015, No 4 (26). Vol. 1, pp. 26–31 (in Russ.).
2. Maleev R.A., Gulin A.N., Mychka N.V., Kuznetsova YU.A. Electric starting system with various current sources. *Izvestiya MGTU «MAМИ»*. 2015, No 4 (26). Vol. 1, pp. 51–55 (in Russ.).
3. Maleev R.A., SHmatkov YU.M. Selection of an electric starter system with a capacitive energy storage and a battery. *Izvestiya MGTU «MAМИ»*. 2013. No 2 (16). Vol. 1, pp. 125–129 (in Russ.).
4. Maleev R.A., SHmatkov YU.M. The method of calculating the electric starter system with battery and capacitive energy storage. *Izvestiya MGTU «MAМИ»*. 2013. No 2 (16). Vol. 1, pp. 129–133 (in Russ.).
5. Akimov A.V., Varlamov D.O., Zuev S.M. *Konstrukciya, opisaniye raboty i provedeniye diagnostiki sistemy ehlektrostarternogo puska sovremennykh transportnykh sredstv* [Construction, description of work and diagnostics of the system of electric starter start of modern vehicles]. Uchebnoye posobie. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 52 p.
6. Hortov V.P., Skvorcov A.A., Zuev S.M. High voltage starting systems for internal combustion engines. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2016, No 10, pp. 24–27 (in Russ.).

7. A.A. Skvortsov, V.P. Khortov, S.M. Zuev. High-voltage starting systems of combustion engines. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 111. No 3, 2016, pp. 455–465.
8. Hortov V.P., Skvorcov A.A., Zuev S.M., Vorozhejkin V.V. Supercapacitor engine start systems. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2016. No 12, pp. 12–16 (in Russ.).
9. SHmatkov YU.M., Lavrikov A.A. *Issledovanie raboty sistemy ehlektrostarternogo puska transportnyh sredstv* [Study of the vehicle electric starter system. Methodical instructions]. Metodicheskie ukazaniya. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 20 p.
10. Zuev S.M., SHmatkov YU.M., Maleev R.A., Hortov V.P., Lavrikov A.A., Varlamov D.O. *EHlektrooborudovanie i ehlektronika avtomobilej v osnovnyh terminah s ih ob'yasneniem na russkom i anglijskom yazykah* [Electric equipment and vehicle electronics in basic terms with their explanation in Russian and English]. Uchebnyj spravochnik. Moscow: Moskovskij Politekh Publ., 2017. 196 p.
11. Ermakov V.V., Maleev R.A., Holodov A.A., SHmatkov YU.M. Digital belt tension meter for gas distribution mechanism and generator in LADA automobiles. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2018. No 2 (36). Vol. 1, pp. 10–16 (in Russ.).
12. Maleev R.A., SHmatkov YU.M., Holodov A.A. Systems of electric starter start of automobile internal combustion engines with alternative sources of fuel. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2018. No 1 (35). Vol. 1, pp. 33–38 (in Russ.).

## STUDY OF THE MODES OF OPERATION OF CAPACITIVE ENERGY STORAGE IN THE AUTOMOBILE ENGINE START SYSTEMS

PhD in Engineering **R.A. Maleev**, PhD in Physics and Mathematics **S.M. Zuev**,  
PhD in Engineering **A.A. Lavrikov**, **N.P. Grebenchikov**  
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia  
eope@mospolytech.ru

*The article presents data on the study of the operating modes of capacitive energy storage (ES) in the start systems of a modern automobile engine. Experimental dependencies of the main parameters of the electric starter start systems (SSS) using ES are presented. A comparative analysis of alternative energy storage devices revealed that the best performance indicators for specific power are ES, which is achieved due to lower internal resistance. ES are able to quickly give away and accumulate energy. The discharge and charge time is determined by the electricity consumers and the parameters of the charging circuit of ES. Studies of ES in SSS for automotive internal combustion engines (ICE) were carried out, when, instead of the standard battery the battery with a smaller capacity is used, and the ES is located in the remaining part of the volume of battery. At high specific rates of ES, the reliability of the start can be increased with the same total volume and weight of the SSS at low temperatures. The theoretical and experimental studies have allowed to obtain the dependence of the instantaneous and average parameters of the SSS on the time of the engine scrolling, as a result of which the required capacity of the ES and its internal resistance, the initial energy of the ES, as well as the necessary volume and mass of the ES are determined. The volume and mass of batteries can be determined from the reference literature or by known methods by specific energies of batteries in volume and mass. On the experimental dependences it was shown that the time of the crankshaft scrolling, the number of working strokes and the angle of rotation of the crankshaft to a complete stop  $N_{px}$  depend on the capacity and charge voltage of the ES. The studies were conducted in the Cold Start Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise Research and Experimental Institute of Automobile Electronics and Electrical Equipment together with the Department «Electrical Equipment and Industrial Electronics» of Moscow Polytechnic University, where an experimental assessment of the possibility was made of starting gasoline engines at low temperatures of SSS with ES of high-voltage (capacitors with a voltage of 200 V–290 V) and low-voltage ESs with a voltage of 12 V–16 V.*

**Keywords:** capacitive energy storage, battery, internal combustion engine, electric starter systems, crankshaft scrolling time.