

УДК 621.313

## ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ СТАРТЕРОМ С ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ТЕРМОЗАВИСИМЫМИ МАГНИТАМИ

*С.К. Гнутов<sup>1</sup>, Ю.Б. Казаков<sup>2</sup>, А.Г. Лазарев<sup>1</sup>, Е.А. Шумилов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани  
Россия, 446001, Самарская обл., г. Сызрань, ул. Советская, 45

<sup>2</sup> Ивановский государственный энергетический университет  
Россия, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

*Разработана усовершенствованная электростартерная система пуска двигателей внутреннего сгорания на основе стартеров с высокоэнергетическими магнитами с повышенными магнитными свойствами при низких температурах. Разработаны математические модели, структурно-функциональные схемы имитационного моделирования, исследованы характеристики системы пуска с использованием результатов расчетов нестационарных магнитных и тепловых полей при разных температурах пуска. Результаты экспериментов подтверждают расчеты и улучшение динамических характеристик системы пуска при низких температурах. Температура высокоэнергетических магнитов за время трех попыток пуска и в аварийных режимах не превышает максимально допустимых значений.*

**Ключевые слова:** системы пуска, двигатели внутреннего сгорания, стартеры с постоянными магнитами, моделирование динамических режимов, физические поля.

Для запуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) применяют электро-стартерные системы пуска (ЭСП), содержащие аккумуляторную батарею (АБ), электромагнитное тяговое реле, стартер, реле блокировки, редуктор и другие элементы [1]. ЭСП должна разогнать ДВС и вращать его с частотой вращения  $n > n_{\text{МИН}}$  (угловая скорость вращения  $\omega$ ) в течение времени  $t_{\text{ПУСК}}$ . Ограниченная мощность АБ требует быстрого и гарантированного запуска ДВС, поэтому ЭСП должны иметь высокие динамические показатели – малое время разгона ДВС и достаточно высокую  $n$ . Гарантированный запуск должен осуществляться для АБ, разряженной до  $\Delta C_P = 25\%$ , не более чем за  $z_{\text{П}} = 3$  попытки пуска с интервалами между ними 1 мин в диапазоне температур  $T$  от  $-30$  до  $+30$  °С. При снижении  $T$  запуск ДВС затрудняется – изменяются сопротивления элементов ЭСП, уменьшаются емкость и ток КЗ  $I_{\text{КЗ}}$  АБ, возрастают  $n_{\text{МИН}}$ ,  $t_{\text{ПУСК}}$ , вязкость моторного масла  $\nu$  и момент сопротивления ДВС  $M_{\text{ДВС}}$ . Неисправности ЭСП автомобилей ВАЗ в гарантийный период достигают 18 % всех неисправностей [2]. Это обуславливает целесообразность совершенствования ЭСП и необходимость корректного прогнозирования динамических характеристик ЭСП.

---

*Сергей Константинович Гнутов (к.т.н.), доцент кафедры «Электромеханика и промышленная автоматика».*

*Юрий Борисович Казаков (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электромеханика».*

*Александр Геннадьевич Лазарев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и промышленная автоматика».*

*Егор Алексеевич Шумилов (к.т.н.), доцент кафедры «Электромеханика и промышленная автоматика».*

Рассматривалась ЭСП ДВС автомобиля ВАЗ со стартером 5702.3708 и АБ СТ-55 А.ч. В стартере применены ферритовые постоянные магниты (ПМ) 28СА250. Высокоэнергетические ПМ на основе соединений NdFeB имеют более сильные магнитные свойства (рис. 1). В целях совершенствования стартера 5702.3708 ПМ 28СА250 толщиной 9 мм заменены на ПМ NdFeB толщиной 1,2 мм (рис. 2), которые обеспечивают магнитный поток в стартере  $\Phi$  при  $T = +25^\circ\text{C}$  такой же, как и с ферритовыми большей толщины ПМ. Число полюсов, якорь, диаметр и толщина корпуса стартера не менялись. Число полюсов, якорь, диаметр и толщина корпуса стартера не менялись. Разработанный стартер с ПМ NdFeB стоит не дороже, чем стартер с ферритовыми ПМ.

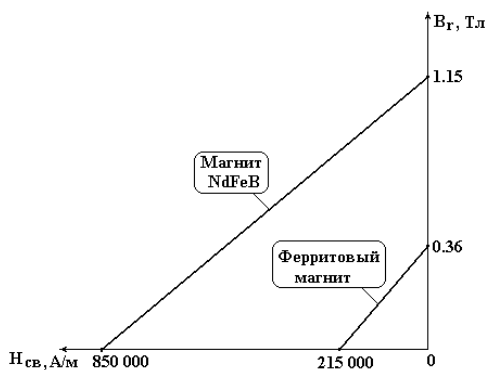


Рис. 1. Магнитные свойства ферритовых и высокоэнергетических ПМ при  $T = 20^\circ\text{C}$

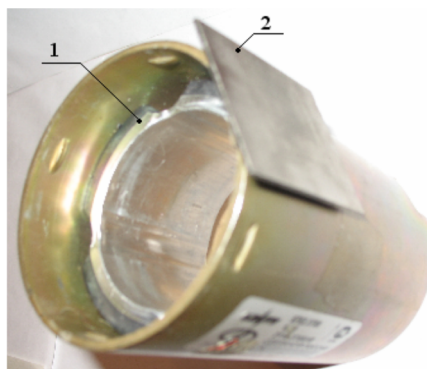


Рис. 2. Магниты индуктора:  
1 – ферритовые 9 мм; 2 – NdFeB 1,2 мм

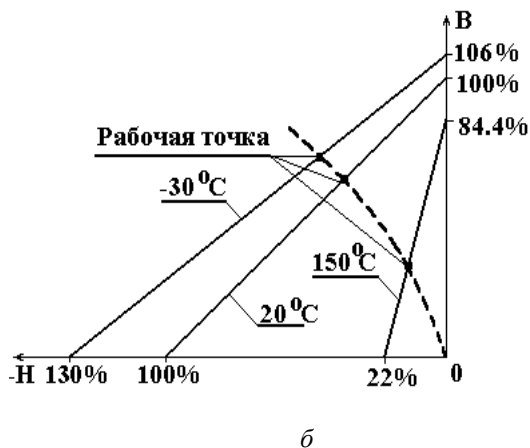
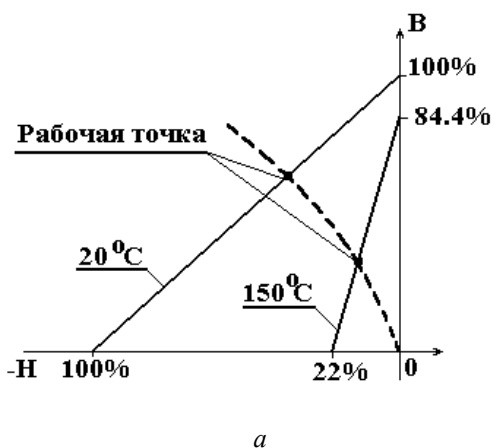


Рис. 3. Магнитные характеристики ПМ NdFeB при разных  $T$   
*а* – характер изменения коэрцитивной силы в диапазоне температур 20-100 $^\circ\text{C}$ ;  
*б* – характер изменения коэрцитивной силы в диапазоне температур -30-100 $^\circ\text{C}$

У ПМ 28СА250 магнитные свойства не зависят от  $T$ . С целью улучшения пусковых характеристик при низких  $T$  перспективно применение в стартерах ПМ с возрастающим  $\Phi$  при снижении  $T$  [3, 4]. Большой  $\Phi$  будет обеспечивать боль-

ший электромагнитный момент стартера  $M_{ЭМ}$ , что приведет к более быстрому разгону ДВС, т. е. улучшению динамических свойств ЭСП при низких  $T$ . Магнитные свойства ПМ NdFeB усиливаются с изменением  $T$  – для остаточной индукции с коэффициентом  $\beta_B = -0,12 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ , для коэрцитивной силы с  $\beta_H = -0,6 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Так, при снижении  $T$  на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  коэрцитивная сила ПМ NdFeB может возрасти до  $60 \text{ \%}$  (рис. 3) [5].

Применяемое в настоящее время моделирование пусковых характеристик ЭСП [6] не всегда учитывает возникновение в динамических режимах взаимосвязанных переходных процессов: электромагнитных переходных процессов в электрических и магнитных цепях, механического процесса разгона стартером ДВС, переходного теплового процесса нагрева элементов ЭСП. В процессе пуска вследствие изменения магнитных свойств ПМ при разных  $T$ , тока  $I$ , потока реакции якоря  $\Phi_a$ , определяемого  $I$ , демпфирования  $\Phi_a$  наводимыми вихревыми токами в сплошных проводящих элементах конструкции – сплошном корпусе, массиве ПМ, ферромагнитных полюсных вставках, определяемых скоростью изменения тока  $dI/dt$ , в стартере сложным образом меняются результирующий магнитный поток  $\Phi$  и  $I$ . Изменение магнитных свойств ПМ NdFeB с изменением  $T$  и температурное ограничение работы для них до  $155 \text{ }^\circ\text{C}$  требуют корректного взаимоувязанного термоманитного анализа состояния этих ПМ в переходных процессах и аварийных режимах. Сочетание разнонаправленных зависимостей повышает сложность расчетного анализа динамических характеристик ЭСП с термозависимыми ПМ в стартерах в процессе пуска ДВС. Поэтому моделирование динамических режимов работы ЭСП со стартерами на основе ПМ NdFeB при пуске, в старт-стоповом режиме с учетом меняющихся параметров АБ, стартера и других элементов ЭСП в процессе пуска требует использования моделей с учетом влияния  $T$  на параметры пуска, численных моделей электромагнитных и тепловых полей [7], организации взаимодействия систем расчета переходных электромеханических процессов и нестационарных физических полей.

Математическая модель ЭСП с термозависимыми ПМ в стартерах может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AB}(T, \Delta C_p, I, R_{AB}) = L \frac{dI}{dt} + IR_{ЭСП} + e_a + \Delta U_{щ}; \\ R_{ЭСП} = R_{AB} + R_a = f(T); \\ L_a = \frac{0.6U}{pI_n \omega_n} \frac{I_{II} - 0.2I}{I_{II}} = f(I); \\ \Phi = f(I, \frac{dI}{dt}, T); \\ e_a = k\omega\Phi; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{ЭМ} - M_0 - M_{ДВС}; \\ M_{ЭМ} = kI\Phi; \\ M_0 = f(\omega, \Phi); \\ M_{ДВС} = (390 + 3.12n_{ДВС})V_y \sqrt{v}; \\ v = f(T). \end{array} \right. \quad (1)$$

Напряжение АБ  $U_{AB}$  зависит от  $T$ ,  $\Delta C_p$ ,  $I$ , внутреннего сопротивления  $R_{AB}$ , которое, в свою очередь, зависит от  $T$ ,  $\Delta C_p$ ,  $z_{II}$ . С повышением  $T$  снижается  $R_{AB}$ , возрастают  $U_{AB}$  и ток КЗ  $I_{КЗ}$ . Вольт-амперные внешние характеристики АБ 6СТ-55М для некоторых переменных представлены на рис. 4. Сопротивление обмотки якоря стартера  $R_a$  с повышением  $T$  возрастает. Так, при  $T = +25$  °С  $R_{a+25} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $R_{AB+25} = 10,9 \cdot 10^{-3}$  Ом, суммарное сопротивление ЭСП  $R_{ЭСП+25} = 0,01423$  Ом, что соответствует пусковому току в ЭСП  $I_{II+25} = 702$  А. При  $T = -30$  °С  $R_{ЭСП-30} = 0,03306$  Ом и  $I_{II-30} = 303$  А.

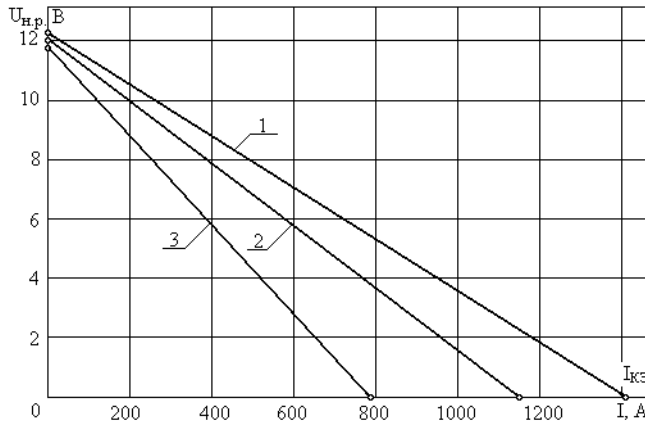


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики АБ 6СТ-55М:  
 1 –  $z_{II} = 1$ ,  $T = +25$  °С,  $\Delta C_p = 0$ ; 2 –  $z_{II} = 3$ ,  $T = 0$  °С,  $\Delta C_p = 25$  %;  
 3 –  $z_{II} = 3$ ,  $T = -20$  °С,  $\Delta C_p = 25$  %

Индуктивность обмотки якоря стартера  $L_a$  при номинальном токе  $I_H = 286$  А составляет 0,0164 мГн. Общая индуктивность цепи ЭСП  $L$ , включающая  $L_a$ , индуктивности АБ, втягивающего реле и коммутационной аппаратуры принята 0,04 мГн.  $L_a$  снижается с увеличением  $I$ , так как зависит от насыщения магнитной цепи и изменяется с изменением  $\Phi$ .

$\Delta U_{Щ}$  – падение напряжения на щетках;  $e_a$  – ЭДС обмотки якоря;  $M_0$  – момент холостого хода стартера, определяемый механическими потерями, зависящими от  $\omega$ , и потерями в стали, зависящими от  $\Phi$  и  $\omega$ ;  $J$  – момент инерции системы «стартер – ДВС», для рассматриваемого примера  $J = 146,99$ , кг·м<sup>2</sup>.

$M_{ДВС}$  возрастает с повышением  $n_{ДВС}$ ,  $v$  и объема цилиндров  $V_{Ц}$  ДВС.

С понижением  $T$  существенно возрастает вязкость моторного масла  $\nu$ . Так, для масла 15W-30 при  $T = -18$  °С  $\nu_{-18} = 6\,000$  мм<sup>2</sup>/с, при  $T = +100$  °С  $\nu_{+100} = 10$  мм<sup>2</sup>/с. При  $T < 0$  °С зависимость может быть представлена в виде соотношения

$$\nu(T) = -1.3349T^3 - 16.308T^2 - 129.214T + 1172.656.$$

При  $T > 0$  °С –  $\nu(T) = -11.62656T + 1172.656$ .

На основе системы уравнений (1) разработана структурно-функциональная схема имитационного моделирования динамических режимов ЭСП [8]. Нелинейные зависимости задавались в виде функциональных соотношений. Некоторые функции аппроксимировались кубичными полиномами.

Для определения зависимостей  $\Phi = f(I, dI/dt, T)$  с учетом насыщения магнит-

ной системы, наводимых вихревых токов использовано конечно-элементное моделирование стационарных и нестационарных магнитного и теплового полей в поперечном сечении стартера в системе Elcut [9] при разных  $I$  и  $T$  с учетом потоков торцевого и бокового рассеяний ПМ. Учтены нелинейности магнитных и теплофизических характеристик, тепловыделений, влияние на пазовые токи щеточного перекрытия и сдвига щеток и др.

Принято, что намагниченность ПМ распределена по объему и является функцией магнитной индукции; магнитное состояние элементов ПМ определяется кривой возврата. Конечно-элементные модели содержали до 80 000 треугольных конечных элементов.

Для достижения корректных результатов моделирования пусковых процессов в ЭСП реализована итерационная процедура взаимодействия системы моделирования динамических режимов и системы моделирования нестационарных физических полей в стартере (рис. 5).

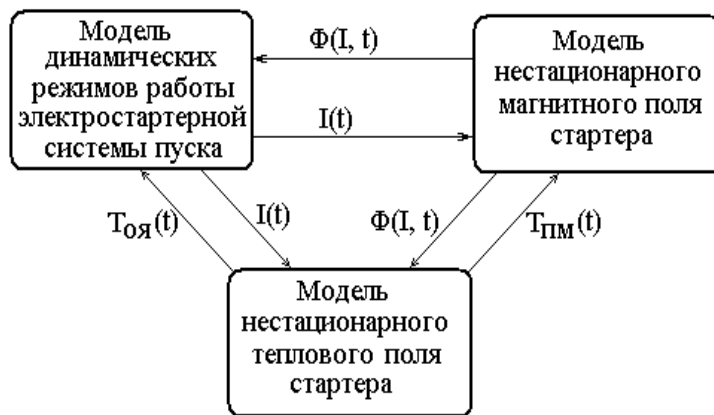


Рис. 5. Взаимодействие систем моделирования динамических режимов ЭСП и нестационарных физических полей

Выполняется уточнение параметров в одной системе и задание их в качестве исходных данных в другую систему. На первой итерации рассчитываются стационарные магнитные поля для ряда значений  $I = 0 \div 703$  А при  $T = +25$  °С и  $I = 0 \div 303$  А при  $T = -30$  °С, определяются  $\Phi$  с учетом насыщения стали и действия реакции якоря. В результате расчетов получена зависимость  $\Phi = f(I, T)$  в виде полиномов третьей степени:

– при  $T = +25$  °С

$$\Phi_{25}^{Стал} (I) = 1.205 \cdot 10^{-13} I^3 - 2.739 \cdot 10^{-10} I^2 - 4.378 \cdot 10^{-7} I + 7.214 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб};$$

– при  $T = -30$  °С

$$\Phi_{-30}^{Стал} (I) = -5.635 \cdot 10^{-14} I^3 - 1.185 \cdot 10^{-10} I^2 - 3.526 \cdot 10^{-7} I + 8.313 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}.$$

Полученные зависимости заданы в модель динамических режимов ЭСП, из расчета которой получены зависимости  $I = f(t, T)$  в виде экспонент:

– при  $T = +25$  °С  $I_{25}(t) = 93.35 + 609.8e^{-12t}$ ;

– при  $T = -30$  °С  $I_{-30}(t) = 233.6 + 68.9e^{-8t}$ .

Далее зависимости  $I = f(t, T)$  заданы в модель расчета нестационарных магнитных полей со значениями электропроводности стали  $\gamma_{+25} = 4,106$  и  $\gamma_{-30} = 5,106$  См/м при  $T = +25$  и  $-30$  °С для учета влияния наводимых вихревых токов в массивах. Результаты второй итерации расчетов магнитных полей – аппроксимирующие полиномы:

– при  $T = +25$  °С

$$\Phi_{25}^{Нестаци}(I) = 5.236 \cdot 10^{-13} I^3 - 4.759 \cdot 10^{-10} I^2 - 3.394 \cdot 10^{-7} I + 7.165 \cdot 10^{-4}; \text{ Вб};$$

– при  $T = -30$  °С

$$\Phi_{-30}^{Нестаци}(I) = -6.65 \cdot 10^{-13} I^3 + 5.889 \cdot 10^{-10} I^2 - 4.125 \cdot 10^{-7} I + 8.291 \cdot 10^{-4}; \text{ Вб}.$$

Зависимости  $\Phi_f^{Нестаци} = f(I, T)$  вновь заданы в модель динамических режимов ЭСП, из расчетов которой получены уточненные функции  $I = f(t, T)$ . Процесс повторяется до тех пор, пока зависимости не перестанут изменяться.

ЭСП с применением в стартерах ПМ NdFeВ изготовлена и испытана в динамических режимах с использованием компьютеризированного диагностического комплекса «Мотор-Тестер МТ10К» и блока автомобильной диагностики АМД-4А. На рис. 6 представлены осциллограмма и расчетная зависимость  $I = f(t)$  при пуске ДВС автомобиля LADA Priora для  $T = -15$  °С. Определено, что переходный процесс составляет 0,25–0,4 сек. Наблюдается удовлетворительное совпадение результатов.

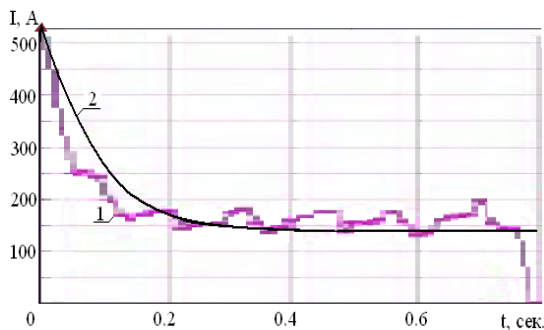


Рис. 6. Изменение  $I$  при пуске: 1 – опыт; 2 – расчет

Выяснено, что при пуске изменяется  $\Phi$  по сложному закону (рис. 7). До пуска существует поток ПМ –  $\Phi_0$ . При пуске  $I$  резко увеличивается,  $\Phi_a$  и реакция якоря возрастают,  $\Phi$  снижается. Динамическое нарастание  $\Phi_a$  наводит в массивных элементах магнитной системы вихревые токи, пропорциональные  $d\Phi_a/dt$  или  $dI/dt$ , которые демпфируют в некоторой степени нарастание  $\Phi_a$  и снижают реакцию якоря. По мере набора  $n$  ток  $I$  и реакция якоря снижаются,  $\Phi$  возрастает. При расчете  $\Phi$  в стартере без учета действия реакции якоря и вихревых токов погрешность определения  $\Phi$  в первые моменты времени пуска ДВС достигает 40–50 %. С учетом действия вихревых токов  $\Phi$  уменьшается в меньшей степени – до 35 %.

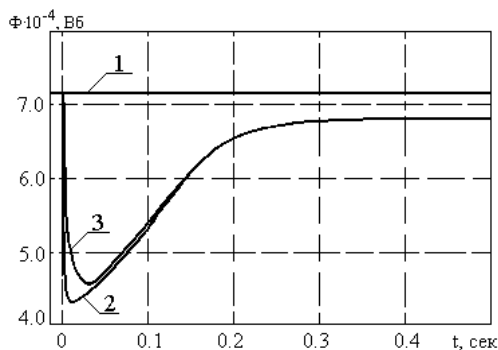


Рис. 7. Изменения  $\Phi$  при пуске для  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1 – без учета реакции якоря и вихревых токов; 2 – с учетом реакции якоря,  
 без учета вихревых токов; 3 – с учетом реакции якоря и вихревых токов

При  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$   $\Phi_{25}$  в первый момент пуска снижается с  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Вб при ХХ до  $4,25 \cdot 10^{-4}$  Вб при  $I_{П+25}$  – на 41 % (рис. 8). При  $T = -30\text{ }^\circ\text{C}$  в первый момент пуска  $\Phi_{-30}$  снижается с  $8,3 \cdot 10^{-4}$  Вб при ХХ до  $7,4 \cdot 10^{-4}$  Вб при  $I_{П-30}$  – на 10,8 %. ПМ NdFeV обеспечивают  $\Phi$  на 15,6 % больший, чем ферритовые ПМ.

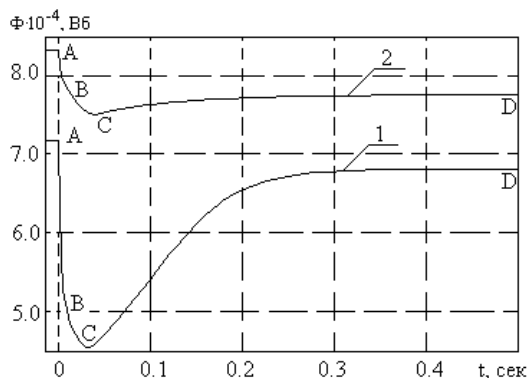


Рис. 8. Изменение  $\Phi$  в стартере с ПМ NdFeV при пуске для  $T$ : 1 –  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-30\text{ }^\circ\text{C}$

Снижение  $I$  для ПМ NdFeV при  $T = -30\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 10, а) происходит интенсивнее, чем для ПМ 28CA250, что является положительным. Для ПМ NdFeV, по сравнению с ПМ 28CA250,  $M_{МАХ-30}$  возрастает на 14,7 % (рис. 9, б). Для ПМ NdFeV  $n_{УСТ-30}$ , по сравнению с ПМ 28CA250, на 34 % больше (рис. 9, в) (550 и 410 об/мин, соответственно  $n_{ДВС} = 40$  и 30 об/мин). ЭСП с ПМ 28CA250 осуществляет разгон до 410 об/мин за  $\sim 0,4$  сек, а с ПМ NdFeV до той же скорости за  $\sim 0,13$  сек, т. е. с более высокими динамическими показателями. Если учесть, что  $n_{МИН} = 40\text{--}70$  об/мин, то при  $T = -30\text{ }^\circ\text{C}$  стартер с ферритовыми ПМ может не запустить ДВС, а с ПМ NdFeV запустит. Обеспечивается более надежный запуск ДВС при низких температурах. Стартер с ПМ NdFeV будет иметь более низкую минимальную температуру запуска ДВС  $T_{min}$ , чем стартер с ферритовыми ПМ.

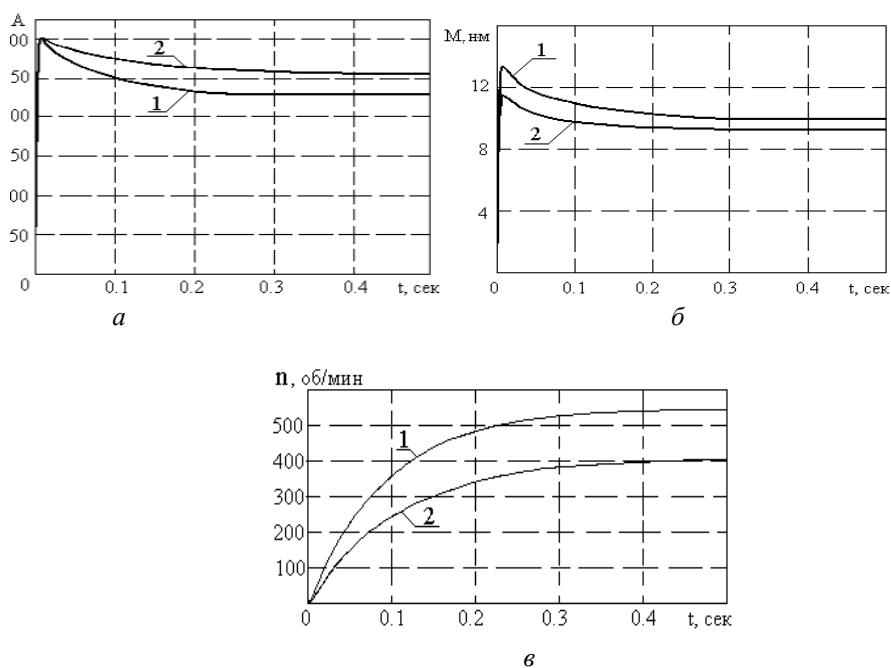


Рис. 9. Изменения  $I$  (а),  $M_{ЭМ}$  (б),  $n$  (в) при  $T = -30$  °C:  
1 – ПМ NdFeB; 2 – ПМ 28CA250

Экспериментальные температурные исследования изменения пускового момента  $M_{П}$  (в режиме установившегося КЗ) проведены на стенде Э242 (рис. 10). Результаты опытных данных подтверждают повышение  $M_{П}$  усовершенствованной ЭСП при  $I = 702$  А на 28,78 % при понижении  $T$  на 103 °C, что соответствует расчетам. В то же время опытная зависимость  $M_{П}$  ЭСП с ферритовыми магнитами от температуры составляет всего 0,3 %/°C и укладывается в погрешность экспериментов.

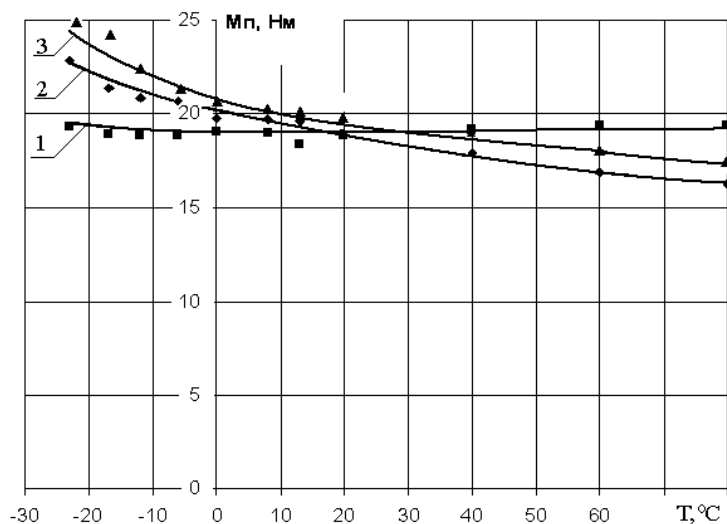


Рис. 10. Зависимость  $M_{П} = f(T)$  для  $I = 702$  А:

1 – ПМ 28CA250; 2 – ПМ NdFeB (опыт); 3 – ПМ NdFeB (расчет)



Выполнены исследования нагрева стартера в старт-стоповом режиме. Временные изменения объемных тепловыделений в стали и обмотке стартера, вызываемые изменениями в процессе пуска  $I$ ,  $n$  и  $\Phi$ , аппроксимировались экспоненциальными зависимостями и задавались в систему расчетов нестационарных тепловых полей. Перегрев обмотки якоря стартера за три попытки пуска ДВС с  $\tau_{II} = 15$  сек и интервалом между ними 1 мин составляет менее  $70^\circ\text{C}$  (рис. 11), корпуса –  $3^\circ\text{C}$ , ПМ NdFeB –  $4^\circ\text{C}$ .

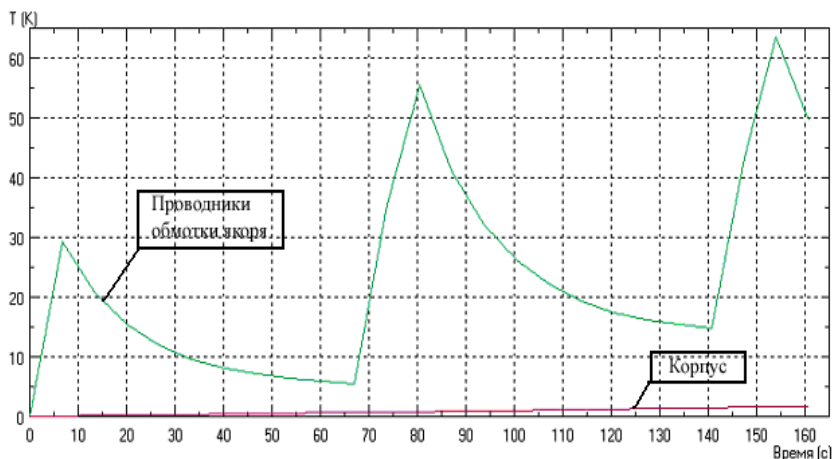


Рис. 11. Изменения  $T$  в стартере за 3 попытки пуска в старт-стоповом режиме

Определено, что в аварийных режимах за время заторможенной попытки пуска – в режиме КЗ в течение 15 сек –  $T$  обмотки якоря достигнет  $151^\circ\text{C}$ , ПМ –  $5,2^\circ\text{C}$ , сердечника якоря –  $33^\circ\text{C}$ . Более всего перегревается и прежде всего выйдет из строя обмотка якоря, при этом  $T$  ПМ NdFeB не превысит  $115^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности ПМ NdFeB выше, а толщина меньше, чем у ферритовых ПМ, поэтому тепловой режим стартеров с ПМ NdFeB менее напряженный. ПМ NdFeB даже при работе ЭСП в аварийных и недопустимых режимах не потеряют магнитных свойств и останутся в работоспособном состоянии.

### Закключение

1. Предложена электростартерная система пуска двигателей внутреннего сгорания с применением в стартерах высокоэнергетических магнитов с возрастающим магнитным потоком при понижении температуры, обеспечивающая при температуре пуска  $-30^\circ\text{C}$  возрастание, по сравнению с применяемыми ферритовыми магнитами, пусковой частоты вращения на 34 %, что гарантирует надежный запуск двигателя внутреннего сгорания.

2. Выполнено моделирование пусковых режимов работы электростартерной системы с использованием функциональных зависимостей изменения параметров в процессе пуска при разных температурах и итерационного взаимодействия систем моделирования переходных электромеханических процессов и нестационарных магнитных и тепловых полей в стартерах. Результаты экспериментов подтверждают расчеты и улучшение динамических характеристик электростартерной системы пуска при низких температурах.

3. Установлено, что за время трех попыток пуска и при работе в аварийных режимах температура высокоэнергетических магнитов не превышает максимально допустимых значений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов С.В., Чишков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. – М.: КЖИ «За рулем», 2004. – 384 с.
2. Чеботков Э.Г., Цопов Г.И., Тарановский В.Р. Виды и характеристики отказов системы электростартерного пуска и пути повышения надежности ее работы // Изв. вузов. Электромеханика. – 2007. – № 6. – С. 50-53.
3. Chan C.C., Chau K.T. An Advanced Permanent Magnet Motor Drive System for Battery Power Electric Vehicles // IEEE Trans. on Vehicular Technology. – 1996. – Vol. 45. – № 1. – P. 180-186.
4. Применение магнитов NdFeB в стартерах для повышения их пусковых свойств при низких температурах / Ю.Б. Казаков, С.К. Гнутов, А.А. Лазарев, А.Г. Лазарев // Перспективные материалы. – 2008. – № 3. – С. 292-296.
5. Магнитные свойства магнитов NdFeB: Пресс-релиз НПО «Магнетон». – Владимир, 1999. – 5 с.
6. Северин А.А. Математическое моделирование при исследовании режимов работы автомобильных стартеров // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – № 3. – С. 21-25.
7. Казаков Ю.Б. Анализ магнитных и тепловых полей магнитоэлектрических машин с учетом термозависимости свойств магнитов // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 23-27.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
9. Руководство пользователя программным комплексом ELCUT 5.5. – СПб: ПК «ТОР», 2007. – 298 с.

*Статья поступила в редакцию 14 января 2017 г.*

## START EXPLOSION ENGINES STARTERS WITH HIGH-ENERGY TEMPERATURE DEPENDENT MAGNET

**S.K. Gnutov<sup>1</sup>, Y.B. Kazakov<sup>2</sup>, A.G. Lazarev<sup>1</sup>, E.A. Shumilov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Samara State Technical University Branch In Syzran  
45, Sovetskaya st., Syzran, Samara region, 446001, Russian Federation

<sup>2</sup>Ivanovo State Power University  
34, Rabfakovskaya st., Ivanovo, 153003, Russian Federation

*The advanced electric starter system of internal combustion engines on the basis of starters with high-energy magnets with improved magnetic properties at low temperatures is developed. The mathematical models, structural and functional simulation schemes are investigated. The characteristics of the system start-up using the results of calculations of non-stationary magnetic and thermal fields at different start temperatures are developed. The results of calculations and experiments confirm the improvement of dynamic characteristics of the start-up system at low temperatures. High-temperature of magnets during three start attempts and in emergency conditions does not exceed the maximum allowable values.*

**Keywords:** *start systems, internal combustion engines, starter motors with permanent magnets in modeling of dynamic modes, the physical field.*

---

*Sergej K. Gnutov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.  
Yuri B. Kazakov (prof.), Head of the department "Electromechanics".  
Alexander G. Lazarev (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.  
Yegor A. Shumilov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.*