

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СТАРТЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОВЫШЕННЫМИ ПУСКОВЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

КАЗАКОВ Ю.Б., д-р техн. наук, ЛАЗАРЕВ А.А., асп., ГНУТОВ С.К., инж.

Выполнена модернизация магнитоэлектрического стартерного электродвигателя для повышения пусковых качеств при низких температурах путем применения высокоэнергетических магнитов NdFeB с отрицательной температурной зависимостью магнитных свойств. Проведено численное моделирование магнитных полей в разных режимах, при разных температурах, для разных магнитов. Определены характеристики стартера. Показаны преимущества применения магнитов NdFeB.

Ключевые слова: стартер, высокоэнергетические магниты, магнитный поток, механические характеристики, пусковая частота вращения.

MAGNETOELECTRIC STARTER MOTOR WITH HIGH START-UP CHARACTERISTICS AT LOW TEMPERATURES

Yu.B. KAZAKOV, Doctor of Engineering, A.A. LAZAREV, Post-Graduate Student, S.K. GNUTOV, Engineer

The article is devoted to the modernization of magnetolectric starter motor for increasing start-up characteristics at low temperatures by using high power NdFeB magnets with negative temperature depending on the magnetic properties. The authors conducted numerical simulation of magnetic fields in different modes, temperatures, and magnets. The starter characteristics are defined. Advantages in using NdFeB magnets are presented.

Key words: starter, high power magnets, magnet flow, mechanical characteristics, starting rotation frequency.

Температурный диапазон работы стартеров значителен. При пуске горячего двигателя внутреннего сгорания (ДВС) температура подкапотного пространства достигает $+90^{\circ}\text{C}$. Зимой пуск может производиться при температуре -30°C . Сопротивление батареи возрастает с понижением температуры и разряженностью батареи. Сопротивление обмоток стартера снижается с понижением температуры. В целом, при низкой температуре пуска снижается пусковой ток и пусковой момент. Вязкость моторного масла и момент сопротивления ДВС при понижении температуры возрастают. Поэтому для стартеров затруднен запуск ДВС при низких температурах.

В настоящее время в ВАЗовских автомобилях десятого семейства применяются

стартеры 5702.3708 с возбуждением от ферритовых магнитов толщиной 9 мм (рис. 1,а). Однако ферритовые магниты имеют невысокие магнитные свойства. С понижением температуры у этих стартеров также снижается пусковой момент, но в меньшей степени, чем для стартеров с электромагнитным последовательным возбуждением. Пусковой ток, не зависящий от марки магнита индуктора, при использовании аккумуляторной батареи 6СТ55 при снижении температуры пуска с $+25^{\circ}\text{C}$ до -30°C снижается с 703 А до 303 А.

Для улучшения пусковых свойств стартеров при низких температурах целесообразно применение высокоэнергетических магнитов NdFeB [1]. Они имеют предельные магнитные свойства и обладают сильной отрицательной

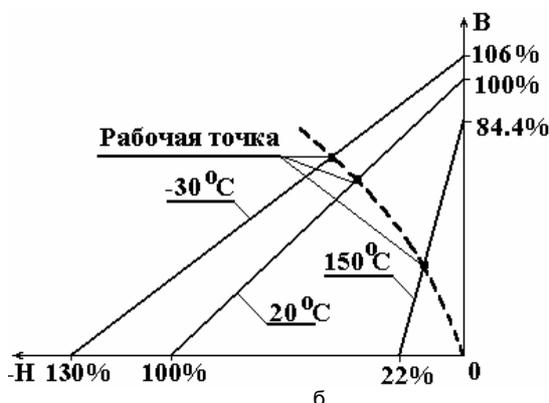
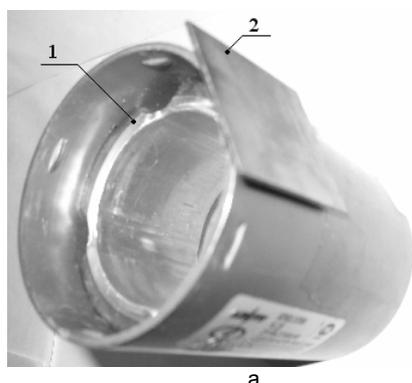


Рис. 1. Магниты стартера: а – магниты 22БА220 толщиной 9 мм (1); магниты NdFeB толщиной 1,2 мм (2); б – магнитные характеристики магнита NdFeB при разных температурах

температурной зависимостью магнитных свойств. Так, для магнитов NdFeB, выпускаемых НПО «Магнетон», коэрцитивная сила увеличивается на 0,6 % при понижении температуры на 1 °С [2] (рис. 1,б). При низкой температуре такие магниты будут создавать повышенный магнитный поток, что обеспечит больший пусковой момент.

Были проведены расчеты характеристик нескольких вариантов starterного электродвигателя [3] и определена целесообразная толщина магнитов NdFeB, создающих такой же магнитный поток в номинальном режиме, – 0,7–0,9 мм (в 13 раз меньше ферритовых). Возможно применение магнитов NdFeB в виде сегментов тонкого кольца. Наружный диаметр starterа 80 мм может быть уменьшен на 16,4 мм и составит 63,6 мм. Но изменение наружного диаметра влечет изменение встроенного планетарного редуктора, мест крепления starterа. Поэтому наружный диаметр и толщину корпуса решено было не изменять. В НПО «Магнетон», по механическим соображениям, были изготовлены магниты NdFeB в виде пластин толщиной 1,2 мм (рис. 1,а). Новая конструкция полюса (рис. 2) была установлена в прежний корпус с добавочным зазором. Якорь с обмоткой не изменялись.

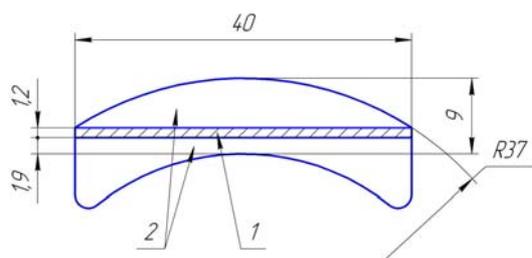


Рис. 2. Измененная конструкция: 1 – магнит; 2 – сталь

Использовано моделирование магнитного поля в поперечном сечении starterа в системе Elcut при разных токах якоря и разных температурах с учетом результатов моделирования потоков торцевого рассеяния магнитов в продоль-

ном сечении. Учитывался сдвиг щеток, величина щеточного перекрытия. Коммутация принималась линейной. Конечно-элементные модели содержали несколько сотен тысяч элементов. Распределения линий магнитного потока в разных режимах представлены на рис. 3. Распределение индукции представлено на рис. 4.

По результатам расчетов магнитных полей определено, что магнитный поток в starterе с магнитами NdFeB зависит от температуры и тока якоря. Так, поток в режиме холостого хода при снижении температуры с +20 °С до –30 °С возрастает на 15,3 %. Для температуры +25 °С поток на полюс снижается с $7,2 \cdot 10^{-4}$ Вб при холостом ходе до $3,18 \cdot 10^{-4}$ Вб при пусковом токе 703 А. Для температуры –30 °С поток на полюс снижается с $8,3 \cdot 10^{-4}$ Вб при холостом ходе до $7,13 \cdot 10^{-4}$ Вб при пусковом токе 303 А.

На рис. 5 представлены механические характеристики starterов с разными магнитами и при разных температурах. Частота вращения идеального холостого хода (ток якоря $I_a = 0$) снижается для starterа с магнитами NdFeB с $n_{ХХNd+20} = 2799$ до $n_{ХХNd-30} = 2460$ об/мин, то есть на 13,8 %, с температурным коэффициентом $-0,276 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Для starterа с ферритовыми магнитами она остается без изменения – $n_{ХХФеррит} = 2799$ об/мин. Пусковой момент у starterа 5702,3708 с магнитами NdFeB при работе совместно с аккумуляторной батареей 6СТ55 при уменьшении температуры пуска с +20 °С до –30 °С снижается в 1,97 раза ($M_{ПNd+20} = 21,09 \text{ Н*м}$, $M_{ПNd-30} = 10,67 \text{ Н*м}$), то есть с температурным коэффициентом $3,94 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Для starterов с ферритовыми магнитами такое снижение больше в 2,24 раза ($M_{ПФеррит+20} = 21,09 \text{ Н*м}$, $M_{ПФеррит-30} = 9,43 \text{ Н*м}$), температурный коэффициент – $4,48 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Это положительное явление для starterа с магнитами NdFeB, так как пусковой ток аккумуляторной батареи с понижением температуры снижается, а возрастание магнитного потока постоянного магнита NdFeB в определенной степени компенсирует снижение пускового момента.

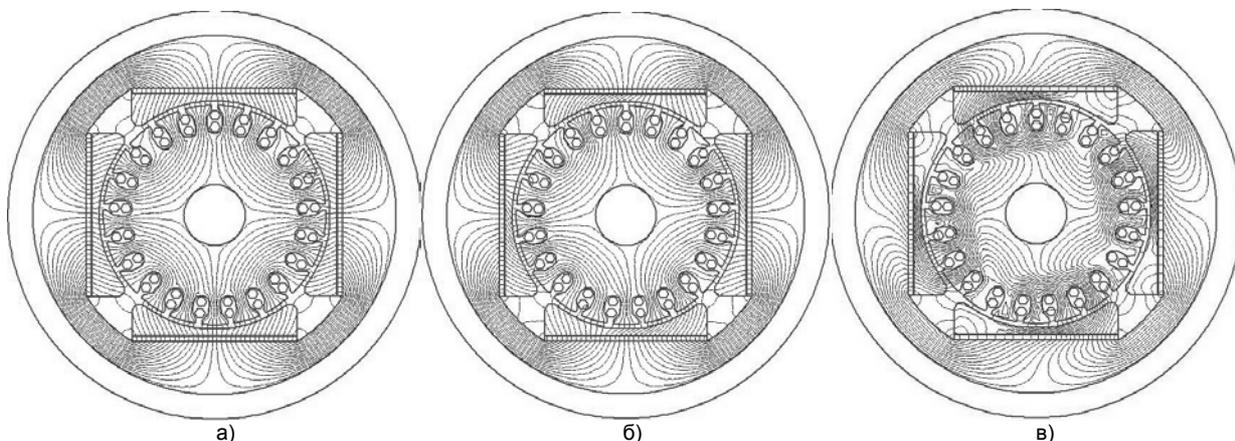


Рис. 3. Распределения линий магнитного потока в starterе с магнитами NdFeB: а – в режиме ХХ; б – в номинальном режиме; в – в момент пуска (режим К3)

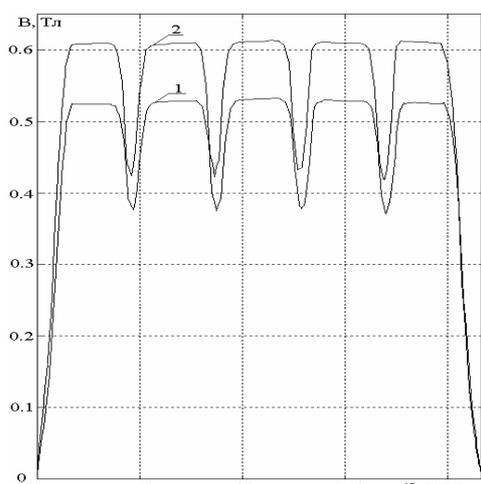


Рис. 4. Распределение нормальной индукции в зазоре стартера с магнитами NdFeV в режиме XX: 1 – при температуре 20 °С; 2 – при температуре –30 °С

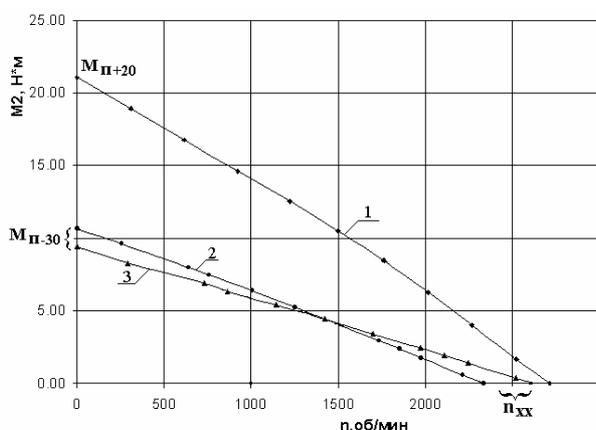


Рис. 5. Механические характеристики стартерного электродвигателя: 1 – с ферритовыми магнитами или магнитами NdFeV при температуре пуска +20 °С; 2 – с магнитами NdFeV при температуре пуска –30 °С; 3 – с ферритовыми магнитами при температуре пуска –30 °С

Механическая характеристика стартера с магнитами NdFeV более «мягкая», чем механическая характеристика стартера с ферритовыми магнитами. Большая «мягкость» механической характеристики стартера с магнитами NdFeV обеспечивается, в том числе, противоположными температурными зависимостями сопротивления батареи и магнитных свойств магнита. Обе механические характеристики пересекаются при половинном токе короткого замыкания и максимальной мощности стартеров. Это свидетельствует о правильном выборе конструкции стартерного электродвигателя с высокоэнергетическими магнитами. При холостом ходе из-за отличающихся магнитных потоков при одинаковой частоте вращения момент на валу стартера с высокоэнергетическими магнитами становится меньше момента стартера с ферритовыми магнитами. При режимах, близких к режиму короткого замыкания, – наоборот, при одинаковой частоте вращения момент на валу стартера с высокоэнергетическими магнитами становится больше, чем момент стартера с ферритовыми магнитами. Оба эти различия подчеркивают преимущества

стартерного электродвигателя с высокоэнергетическими магнитами при холодном пуске, так как пусковой момент становится больше, а частота вращения при холостом ходе меньше. С ростом температуры свойства магнитов падают, но снижается и сопротивление аккумуляторной батареи, что повышает пусковой ток и обеспечивает необходимый пусковой момент.

На рис. 6 на механические характеристики стартерных электродвигателей с ферритовыми магнитами толщиной 9 мм и магнитами NdFeV при температуре –30 °С наложена зависимость момента сопротивления ДВС. Точки пересечения характеристик дают пусковую частоту вращения: $n_{ПФер}$ – для двигателя с ферритовыми магнитами, $n_{ПNd}$ – для двигателя с магнитами NdFeV. Момент сопротивления на коленчатом валу ДВС больше, а его частота вращения меньше, чем у стартерного электродвигателя, в 14,33 раза – передаточное число между шестерней стартера и шестерней маховика. Стартерный электродвигатель с ферритовыми магнитами при температуре –30 °С обеспечивает пусковую частоту вращения 69,78 об/мин, а стартерный электродвигатель с магнитами NdFeV на 13,5 % большую – 79,2 об/мин. Так как минимальная пусковая частота вращения для карбюраторных ДВС составляет 40–70 об/мин, то при температуре –30 °С стартерный электродвигатель с ферритовыми магнитами может не запустить ДВС, а стартерный электродвигатель с магнитами NdFeV сможет. Стартерный электродвигатель с магнитами NdFeV имеет более низкую минимальную температуру пуска ДВС. Таким образом, более надежный запуск ДВС обеспечивается при низких температурах.

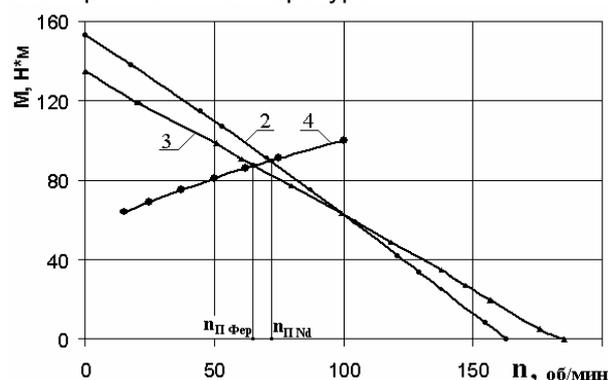


Рис. 6. Определение пусковой частоты вращения при температуре пуска –30 °С: 2 – стартера с магнитами NdFeV; 3 – стартера с ферритовыми магнитами; 4 – ДВС

На стенде Э242 были проведены экспериментальные исследования усовершенствованного стартера при его работе в установившихся режимах (рис. 7). Результаты в целом подтвердили расчетные данные [4].



Рис. 7. Фото экспериментальной установки со стартером

Список литературы

1. Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я. Совершенствование конструкции активной зоны стартерных электродвигателей: Мат-лы Всероссийск. электротехн. конгресса / Академия электротехнических наук РФ. – М., 2005. – С. 162–164.
2. Казаков Ю.Б. Анализ магнитных и тепловых полей магнитоэлектрических машин с учетом термозависимости свойств магнитов // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 23–27.
3. Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Гнутов С.К. Характеристики стартерных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 72–74.
4. Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Гнутов С.К. Опытная реконструкция индуктора магнитоэлектрического стартерного электродвигателя: Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2007. – Т. 2. – С. 76–77.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Лазарев Александр Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Гнутов Сергей Константинович,
Сызранский филиал Самарского государственного технического университета,
старший преподаватель,
e-mail: elmash@em.ispu.ru