

УДК 621.313

Моделирование усовершенствованной электростартерной системы пуска двигателей внутреннего сгорания

Казаков Ю.Б., д-р техн. наук, Лазарев А.А., Баранов М.Е., аспиранты

Выполнено моделирование усовершенствованной электростартерной системы 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 полей при разных температурах.

Ключевые слова: цилиндры внутреннего сгорания, стартеры с постоянными магнитами, математическое моделирование.

Simulation improved electro start-up systems of internal-combustion engines

Kazakov Y. B., Doctor of engineering science, LAZAREV A.A., Graduate student, BARANOV M.E., Graduate student

The simulation improved electro start-up system of internal-combustion engines is made on the basis of starters with high energy magnets with heightened magnetic properties at low temperatures. The mathematical models, structurally functional schemes of simulation modeling are developed, the characteristics of a start-up system with usage of outcomes of calculations of non-steady magnetic fields are studied at the various temperatures.

Keywords: cylinders of internal combustion, starters with constant magnet, mathematical modeling.

Современная электростартерная система пуска (ЭСП) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) представляет собой ряд совместно работающих элементов: аккумуляторной батареи (АБ), втягивающего реле, стартерного электродвигателя, коммутационной аппаратуры и др. Запуск карбюраторного ДВС происходит при вращении его в течение некоторого времени стартером с частотой не менее 40–70 об/мин. На рис. 1 показана осциллограмма пуска ДВС с помощью ЭСП.

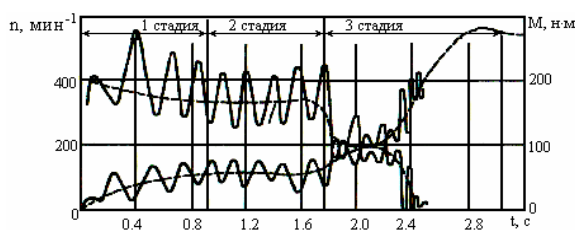


Рис. 1. Осциллограмма запуска ДВС электростартерной системой пуска

ЭСП работает в динамическом режиме. На первой стадии в течение 0,4–0,8 с производится разгон ДВС, на второй – ЭСП вращает ДВС с постоянной скоростью до момента схватывания цилиндров внутреннего сгорания, на третьей стадии, после схватывания цилиндров, ДВС начинает разгоняться сам и раскручивает стартер. В этот момент ЭСП должна отключаться. На осциллограмме проявляются пульсации, связанные с работой цилиндров, но расчеты обычно ведутся по усредненной характеристике.

Успешность запуска ДВС определяется параметрами элементов ЭСП. При пуске с изменением тока якоря I_a напряжение на стартере изменяется – АБ имеет ограниченную мощность. Ее напряжение U_{AB} , зависящее от степени разряженности ΔC_P АБ, уравнивается падениями напряжений на щетках $\Delta U_{щ}$ и в активном сопротивлении якоря и подсоединительных проводов R_a , ЭДС самоиндукции в якоря, определяемой индуктивностью обмотки якоря L_a и производной от тока якоря по времени dl_a/dt , и ЭДС вращения в якоря e_a , определяемой частотой вращения ω и основным магнитным потоком полюса Φ . Магнитный поток Φ изменяется под действием потока якоря, сам поток якоря зависит от I_a и dl_a/dt , так как во время пуска и изменения I_a возникает демпфирование потока якоря со стороны сплошного корпуса и полюса. L_a , в свою очередь, зависит от насыщения магнитной цепи и изменяется с потоком якоря (током якоря). Электромагнитный момент стартера $M_{ЭМ}$ определяется Φ и I_a , момент сопротивления стартера M_0 зависит от ω и Φ , так как механические потери $\Delta P_{мех}$ зависят от ω , а потери в стали $\Delta P_{сталь}$ – от частоты перемагничивания и величины индукции. Момент сопротивления ДВС $M_{ДВС}$ определяется вязкостью моторного масла ν и ω . Динамический момент стартера во время пуска определяется моментом инерции якоря и присоединенных вращаемых частей J и действующими на якорь моментами $M_{ДВС}$, $M_{ЭМ}$ и M_0 .

Параметры элементов ЭСП также зависят от их температур T . С понижением T $M_{ДВС}$ увеличивается из-за возрастания вязкости масла, R_a снижается, у АБ снижается напряжение холостого хода $U_{АБХХ}$, снижается ток короткого замыкания $I_{АБкз}$, зависящий также от попытки пуска z_n и ее длительности τ_n , и повышается внутренне сопротивление $R_{АБ}$, что приводит к снижению пускового момента стартера. В целом с понижением температуры процесс запуска ДВС затрудняется. Поэтому совершенствование ЭСП в целях улучшения ее пусковых характеристик при низких температурах является актуальной задачей.

Повысить пусковой момент при низких температурах возможно увеличением Φ . В современных ЭСП начинают применяться стартеры с постоянными магнитами (ПМ), так как, по сравнению с электромагнитным последовательным возбуждением, применение ПМ позволяет избежать ухода стартера в «разнос» и осуществить при повышенных ω перевод стартера в генераторный режим. В [1] предложено для совершенствования ЭСП в стартерах вместо ферритовых ПМ применять высокоэнергетические ПМ NdFeB с увеличивающимися при понижении температуры магнитными свойствами. При снижении температуры таких ПМ ($T_{ПМ}$) на 100°C их магнитные свойства могут возрасти до 60 %. При низкой температуре будут создаваться большие Φ и $M_{ЭМ}$. Весь этот комплекс проблем показывает, насколько сложной является задача расчета характеристик ЭСП и анализа процесса пуска ДВС.

Корректный анализ характеристик ЭСП может быть выполнен на основе современных систем моделирования. Система уравнений ЭСП может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{АБ} = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + e_a + \Delta U_{щ}; \\ e_a = k\omega\Phi; \\ L_a = f(I_a); \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{ЭМ} - M_0 - M_{ДВС}; \\ M_{ЭМ} = kI_a\Phi; \\ M_0 = f(\omega, \Phi); \\ M_{ДВС} = f(\omega, T_{ДВС}); \\ U_{АБ} = f(U_{АБХХ}, I_a, R_{АБ}, T_{АБ}); \\ \Phi = f(I_a, \frac{dI_a}{dt}, T_{ПМ}); \\ R_a = f(T_a), \quad R_{АБ} = f(T_{АБ}). \end{array} \right. \quad (1)$$

Разработана структурно-функциональная схема имитационного моделирования ЭСП в системе MatLab Simulink (рис. 2).

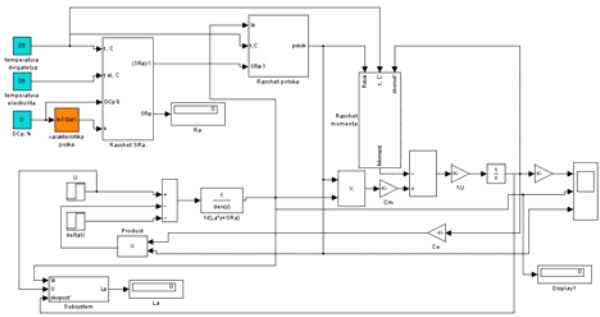


Рис. 2. Главное окно структурно-функциональной схемы имитационного моделирования ЭСП

Во вспомогательных окнах основной схемы моделирования сформированы частичные схемы моделирования обозначенных выше зависимостей параметров ЭСП от тока якоря, его производной по времени, частоты вращения, магнитного потока, температуры. Нелинейные зависимости задавались в виде функциональных соотношений. Некоторые функции аппроксимировались кубическими полиномами.

Параметры аккумуляторной батареи определяются следующим образом:

$$U_{АБХХ}(T_{АБ}) = k(2,02 + 0,00136T_{АБ} - 0,001\Delta C_p);$$

$$I_{АБкз}(T_{АБ}) = n(I_0 + k_b T_{АБ} - k_c \Delta C_p - k_d(z_n - 1) - k_c(\tau_n - 10)(z_n - 1));$$

$$R_{АБ}(T_{АБ}) = U_{АБХХ} / I_{АБкз};$$

$$U_{АБ}(T_{АБ}) = U_{АБХХ} - I_a R_{АБ};$$

Параметры обмотки якоря:

$$R_a(T_a) = R_{a20^\circ\text{C}}(1 + 0,004(T_a - 20));$$

$$L_a(I_a) = \frac{k U_H}{p I_H \omega_H} \frac{I_\Gamma - 0,2I_a}{I_\Gamma},$$

где $I_\Gamma(T) = U_{АБХХ}(T_{АБ}) / [R_{АБ}(T_{АБ}) + R_a(T_a)]$ – пусковой ток в зависимости от температуры пуска T .

Момент сопротивления стартера:

$$M_0(\Phi, \omega) = \frac{\Delta P_{мех}(\omega) + \Delta P_{маг}(\Phi, \omega)}{\omega}$$

$M_{ДВС}$ при объеме цилиндров V :

$$M_{ДВС}(\omega, T_{ДВС}) = (390 + 3,12n)\sqrt{V}v_\omega,$$

$$\text{где } v(T_{ДВС}) = -1,3349T_{ДВС}^3 - 16,308T_{ДВС}^2 -$$

$-129,214T_{ДВС} + 1172,656$ – зависимость вязкости моторного масла SAE 15W-30 от температуры.

Было выполнено моделирование усовершенствованной ЭСП ДВС с объемом цилиндров $V = 1,5$ л автомобиля ВАЗ 2110 со стартером 37.5708 и аккумуляторной батареей СТ-55 Ач. Момент инерции механической системы «стартер 37.5708 – ДВС ВАЗ 2110» составил

$$\Sigma J = \Sigma J_{стартер} + \Sigma J'_{ДВС} = 146,99 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Так как ПМ NdFeB обладает очень сильными магнитными свойствами, то используемые в

стартере 37.5708 в настоящее время ферритовые ПМ толщиной 9 мм достаточно заменить ПМ NdFeB толщиной всего 0,6–0,9 мм для обеспечения такого же магнитного потока при $T = +25^\circ\text{C}$. Такая конструкция полюсов с ПМ NdFeB ОАО «МАГНЕТОН» была реализована в стартере.

Для определения Φ с учетом насыщения стальных участков магнитной системы и зависимости $\Phi = f(I_a, T)$ использовано моделирование магнитного и теплового полей в поперечном сечении стартера в системе Elcut при разных I_a и T с учетом потоков торцевого и бокового рассеяний ПМ. Учитывался сдвиг щеток и величина щеточного перекрытия. Коммутация принималась линейной. Температуры ПМ $T_{ПМ}$ и якоря T_a определялись из расчетов тепловых полей. Конечно-элементные модели содержали несколько сотен тысяч элементов. Распределения магнитного потока и индукции в разных режимах представлены в [1]. Магнитные свойства магнита NdFeB, в зависимости от температуры, приняты в виде

$$H_{свТПМ} = H_{св20}[1 + \beta_H(T_{ПМ} - 20)],$$

$$B_{rТПМ} = B_{r20}[1 + \beta_B(T_{ПМ} - 20)],$$

где $\beta_{св} = -0,6 \text{ \%}/^\circ\text{C}$; $\beta_r = -0,12 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

По результатам расчетов магнитных полей определено, что Φ в стартере в режиме ХХ при температуре -30°C выше на 16%, чем при температуре $+25^\circ\text{C}$. Выявлено, что реакция якоря сильно искажает магнитное поле в стартере и ее не учет приводит к существенной погрешности определения Φ при переходе от режима ХХ к режиму КЗ – до 50%. По результатам расчетов стационарных магнитных полей зависимости $\Phi = f(I_a)$ для заданных $T_{ПМ}$ аппроксимировались кубическими полиномами. Так, для $T_{ПМ} = -30^\circ\text{C}$

$$\Phi(I_a, -30^\circ\text{C}) = -5,635 \cdot 10^{-14} I_a^3 - 1,185 \cdot 10^{-10} I_a^2 - 3,526 \cdot 10^{-7} I_a + 8,313 \cdot 10^{-4}.$$

Значения $\Phi = f(T_{ПМ})$ для заданного I_a получались линейной интерполяцией результатов расчетов магнитных полей для $T = -30$ и $+25^\circ\text{C}$:

$$\Phi(I_a, -30^\circ\text{C}) = -5,635 \cdot 10^{-14} I_a^3 - 1,185 \cdot 10^{-10} I_a^2 - 3,526 \cdot 10^{-7} I_a + 8,313 \cdot 10^{-4}.$$

При пуске стартер работает в переходном электромеханическом режиме, в нем возникают нестационарные магнитные и тепловые поля. Происходит нагревание стартера. Требуется решать задачи анализа нестационарных магнитных и тепловых полей. Возникает проблема, когда нельзя смоделировать ЭСП, не зная результатов расчета нестационарных тепловых и магнитных полей в стартере. И в то же время нельзя рассчитать нестационарные магнитные и тепловые поля, не зная результатов изменения протекающих в ЭСП I_a и выделяемых потерь в стартере. Была реализована итерационная процедура взаимодействия двух

систем моделирования MatLab Simulink и Elcut, которые взаимно дополняли друг друга. Выполнялось уточнение параметров в одной системе и задание их в качестве исходных для другой системы. Это позволило в конечном итоге получить характеристики ЭСП с учетом результатов расчетов нестационарных магнитных полей в стартере и учетом динамических изменений этих характеристик во времени.

На рис. 3 представлено изменение тока в ЭСП во времени t при температурах $+25^\circ\text{C}$ и -30°C . При температуре -30°C ток КЗ меньше, чем при $+25^\circ\text{C}$, и меняется не так значительно, так как $M_{ДВС}$ с понижением температуры возрастает.

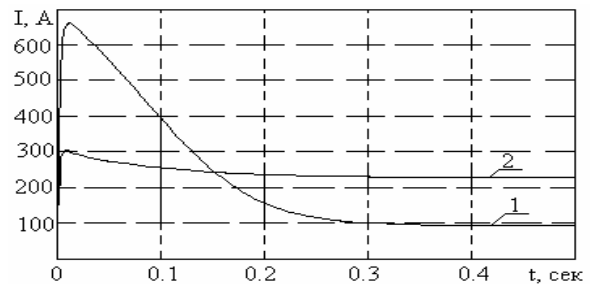


Рис. 3. Изменение токов якоря во время пуска: 1 – при $T = +25^\circ\text{C}$; 2 – при $T = -30^\circ\text{C}$

Такие зависимости аппроксимировались и задавались в систему расчета полей. Например, на одном из этапов $I_a = 93,35 + 609,8e^{-12t}$ при $T = +25^\circ\text{C}$ и $I_a = 233,6 + 68,9e^{-8t}$ при $T = -30^\circ\text{C}$.

Графики изменения $\Phi = f(I_a, t)$ при разных T представлены на рис. 4, 5.

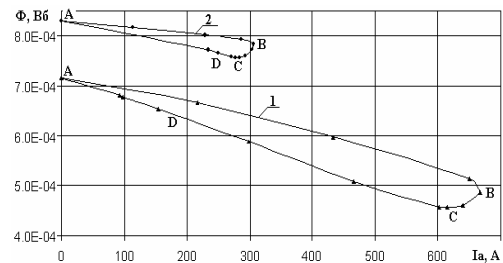


Рис. 4. Изменение магнитного потока от тока якоря во время пуска: 1 – при $T = +25^\circ\text{C}$; 2 – $T = -30^\circ\text{C}$

До момента пуска магнитный поток Φ в стартере определяется точкой А (режим ХХ). При пуске в процессе быстрого нарастания I_a достигает $I_{П} = 700$ А. Магнитный поток Φ из-за возрастания реакции якоря снижается и перемещается в точку В, но в этот период dl_a/dt имеет наибольшее значение и происходит наибольшее демпфирование потока якоря со стороны сплошного корпуса и полюса. Далее dl_a/dt и демпфирование потока якоря снижаются, поток якоря при том же I_a возрастает, Φ снижается до точки С. Далее, по мере разгона ДВС, I_a снижается, Φ возрастает и переходит в номинальный режим (точка Д).

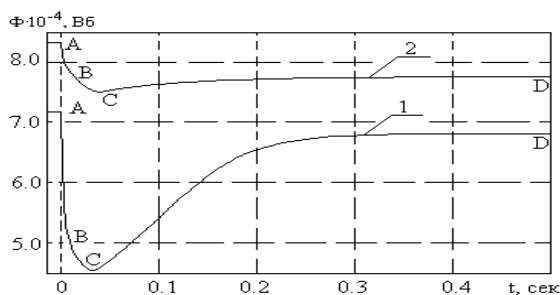


Рис. 5. Изменение магнитного потока во время пуска: 1 – при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Неучет демпфирования потока якоря завышает его действие и приводит к погрешности определения Φ при переходе от режима ХХ к режиму КЗ до 20 %. При $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ПМ NdFeВ имеет наибольшие магнитные свойства, но при этом, вследствие худших свойств АБ, I_{Γ} меньше $\sim 300\text{ А}$. С учетом демпфирования потока якоря в первый момент в режиме КЗ Φ уменьшается в меньшей степени, чем при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие зависимости $\Phi = f(t)$ аппроксимировались и задавались обратно в систему моделирования ЭСП.

Результаты моделирования $\omega = f(t)$ в ЭСП с учетом результатов расчетов нестационарных магнитных полей представлены на рис. 6.

Казаков Юрий Борисович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Лазарев Александр Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
аспирант кафедры электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Баранов Михаил Евгеньевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
аспирант кафедры электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

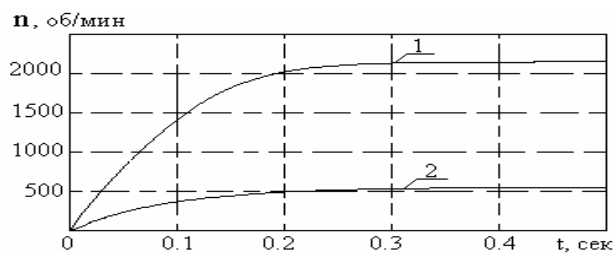


Рис. 6. Изменение частоты вращения во время пуска: 1 – при $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$

В силу использования редуктора, момент сопротивления $M_{ДВС}$ на коленчатом валу больше, а ω меньше, чем у стартера. При $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ пусковой момент у ЭСП с ПМ NdFeВ, по сравнению с ферритовыми ПМ, возрастает на 15 %. Результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Казаков Ю.Б., Лазарев А.А., Гнутов С.К. Магнитоэлектрический стартерный электродвигатель с повышенными пусковыми свойствами при низких температурах // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 3. – С. 39–41.