

$$W_{\text{нео}} = \frac{W_{\text{п}}}{S_{\text{эм}} S_{\text{р}} (1-k)^2},$$

где: $S_{\text{эм}}$ – электромагнитный КПД,

$$P_2 = \frac{\pi n_2 M_2}{30} \text{ – полезная мощность СЭ,}$$

$$M_2 = \frac{M_c}{u S_{\text{р}}} \text{ – полезный вращательный момент СЭ,}$$

$S_{\text{р}}$ – КПД передачи от СЭ к ДВС ($S_{\text{р}} = 0.85$),

$P = E_a I_a$ – электромагнитная мощность СЭ,

$K = \frac{I_a}{I_k}$ – кратность рабочего тока СЭ I_a току короткого замыкания I_k .

Частота вращения якоря СЭ равна:

$$n_a = n_{\text{max}} u,$$

и, следовательно, определяется только средней пусковой частотой вращения $n_{\text{ср}}$.

Полезный вращательный момент M_2 зависит от среднего момента сопротивления, который определяется $n_{\text{ср}}$ и не зависит от числа попыток пуска $Z_{\text{п}}$. Таким образом, СЭ P_2 не зависит от $Z_{\text{п}}$.

Результаты расчетов показывают, что уменьшение времени одной попытки прокручивания $t_{\text{пр}}$ (увеличение числа попыток пуска $Z_{\text{п}}$).

КПД СЭП не изменяется с увеличением числа попыток пуска $Z_{\text{п}}$, так как пропорционально уменьшаются как полная, так и остаточная энергия НЭ:

$$S_{\text{сэп}} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_{\text{нео}}}.$$

При заданной постоянной времени НЭ $\tau_{\text{нэ}}$ увеличение числа попыток пуска $Z_{\text{п}}$ позволяет уменьшить среднюю пусковую частоту вращения $n_{\text{ср}}$ и требуемую емкость НЭ.

Таким образом, увеличение числа попыток пуска $Z_{\text{п}}$ при неизменном общем времени прокручивания $t_{\text{п}}$ позволяет уменьшить габаритно-массовые показатели СЭП, повысить надежность пуска и увеличить срок службы элементов СЭП.

Литература

1. Водорезов С.В., Квайт С.М., Малеев Р.А., Чижков Ю.П. Исследования процессов прокручивания двигателей внутреннего сгорания системой электростартерного пуска с емкостным накопителем энергии. Деп. В ЦНИИТЭИ Автопроме 11.12.89 г. № 1966 – ап. 89.
2. Чижков Ю.П., Малеев Р.А., Меркулов Р.В., Седькин И.В. Определение основных параметров системы электростартерного пуска для автомобильного двигателя с емкостными накопителями энергии // Сб. научных трудов МАМИ: Электрическое и электронное оборудование автомобилей, тракторов и их роботизированных производств. – М.: МАМИ, 1992, - с. 101-105.
3. Tom Denton Automobile Electrical and Electronic Systems. // Associate Lecturer, Open University. - 2010, - с 110-127.

Расчет параметров системы электростартерного пуска двигателя с комбинированным источником тока

к.т.н. доц. Малеев Р.А., Мычка Н.В., Гулин А.Н., Капралова М.А.
 Университет машиностроения
 +79262350847

Аннотация. В работе предлагается использовать сравнительную оценку систем электростартерного пуска с емкостным накопителем и аккумуляторной батареей для двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: система электростартерного пуска, емкостной накопитель энергии, аккумуляторная батарея, энергия, пусковая частота вращения.

В настоящее время в автотракторных СЭП в основном применяются стартерные электродвигатели с последовательным возбуждением, у которых ток якоря является одновремен-

но и током возбуждения, и, следовательно, изменение нагрузки электродвигателя или напряжения его питания приводит к изменению магнитного потока возбуждения.

В то же время в ряду случаев находит применение и СЭП с электродвигателями, имеющими независимое возбуждение. Особенно часто подобные двигатели используют возбуждение от постоянных магнитов, развитие которых позволяет получить большие магнитные потоки при относительно малых габаритах и массах последних. Особенность указанных стартерных электродвигателей заключается в том, что в них изменение магнитного потока с изменением нагрузки на стартерный электропривод незначительно. Изменение магнитного потока в них при изменении нагрузки может происходить в основном за счет размагничивающего действия реакции якоря. Если пренебречь реакцией якоря, то магнитный поток возбуждения можно считать постоянным при различных режимах работы. Такое допущение не должно внести каких-либо существенных погрешностей в расчеты режимов работы электропривода, но в то же время упрощаются расчетные формулы и сравнительная оценка СЭП с АБ и НЭ в различных условиях пуска ДВС.

Электромагнитный вращательный момент двигателя:

$$M = C_m I_a \Phi,$$

где: C_m – постоянная электрической машины;

I_a – ток якоря;

Φ – магнитный поток возбуждения.

Так как для двигателя независимого возбуждения магнитный поток постоянен, то электромагнитный вращающий момент определяется только величиной тока якоря I_a .

Уравнение ЭДС для цепи питания СЭ можно записать (в независимости от типа источника) в следующем виде:

$$E_a = U_n - I_a R_{a\Sigma},$$

где: U_n – номинальное напряжение СЭП,

$R_{a\Sigma}$ – суммарное сопротивление цепи якоря.

Суммарное сопротивление цепи якоря складывается из внутреннего сопротивления источника питания $R_{ист}$, сопротивления стартерной цепи (стартерного провода и «массы») $R_{пр}$ и сопротивления стартера $R_{ст}$ (сопротивление в щеточно-коллекторном узле и сопротивление в обмотках якоря):

$$R_{a\Sigma} = R_{ист} + R_{пр} + R_{ст}.$$

Если через I_k обозначить силу тока якоря в режиме короткого замыкания, то он равен:

$$I_k = \frac{U_n}{R_{a\Sigma}}.$$

С учетом этого уравнение ЭДС для цепи питания системы электропривода можно представить в виде:

$$E_a = U_n - \frac{U_n I_a}{I_k} = U_n (1 - k),$$

где: $k = \frac{I_a}{I_k}$ – кратность силы тока в рабочем режиме силе тока в режиме короткого замыкания.

Учитывая, что ЭДС E_a определяется в тоже время соотношением:

$$E_a = C_e n_a \Phi,$$

можно получить выражение для частоты вращения двигателя n_a :

$$n_a = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U_n (1 - k)}{C_e \Phi}.$$

Для расчета СЭП как с НЭ в виде конденсаторной батареи, так и с АБ необходимо знать требуемую для пуска частоту вращения коленчатого вала двигателя. Сам запуск двигателя представляет собой переходный процесс, при котором частота вращения ДВС n изменяется от нуля до величины, при которой происходит собственно пуск двигателя.

Для СЭП с аккумуляторной батареей практически через очень короткий промежуток времени (обычно меньше секунды) характер вращения ДВС носит уже стационарный характер. Именно в этом режиме происходит собственно пуск двигателя. Это связано с тем, что необходимо время для образования горючей смеси и доставки ее к цилиндрам.

Все это позволяет производить расчеты СЭП при некоторой средней частоте вращения,

которая для системы с АБ равна установившейся частоте вращения. Несколько иначе обстоит дело в системе пуска с НЭ в виде конденсаторной батареи, напряжение на которой по мере разряда уменьшается. В этом случае для упрощения расчетов можно ориентироваться на среднюю частоту вращения, которая изменяется от $2n$ до 0. Расчетной для СЭП с НЭ является частота максимальная в начале прокручивания $2n$.

При проектировании СЭП с АБ на заданные условия пуска ДВС в качестве расчетной мощности принимается электромагнитная мощность СЭ в выбранном рабочем режиме по кратности тока:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{эм}}} = \frac{\pi M_c n_{\text{ср}}}{30 \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{эм}}},$$

где: P_2 – полезная мощность на валу электродвигателя,

$\eta_{\text{эм}}$ – электромагнитный КПД, учитывающий магнитные и механические потери в стартерном электродвигателе,

$\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи от СЭ к ДВС,

M_c – момент сопротивления вращению коленчатого вала при заданной средней частоте вращения $n_{\text{ср}}$.

Расчетная частота вращения якоря электродвигателя связана с частотой вращения коленвала ДВС через передаточное число привода i :

$$n_a = n_{\text{ср}} i.$$

Приведенная выше формула для расчетной мощности содержит один из важных параметров, характеризующих конкретный тип двигателя внутреннего сгорания – момент сопротивления вращению коленчатого вала M_c . Он определяется многими конструктивными особенностями ДВС, состоянием двигателя, сортом применяемого масла, температурой. Поэтому наиболее точные данные по этому моменту могут быть получены экспериментально в результате снятия характеристики $M_c = f(n)$ при заданных режимах эксплуатации.

Электромагнитная мощность:

$$P = E_a I_a = \frac{U_{\text{н}}^2}{4R_{\alpha\Sigma}} = \frac{P}{4(1-\kappa)\kappa}.$$

Для расчета системы электропривода необходимо иметь исходные данные. К ним относятся: номинальное напряжение $U_{\text{н}}$, расчетная электромагнитная мощность $P_{\text{ср}}$, частота вращения якоря электродвигателя n_a или частота вращения коленвала ДВС, технические характеристики источника электропитания. Кроме того необходимо задаваться средней частотой вращения при максимальной электромагнитной мощности. С частотой вращения n_m связана кратность тока:

$$K = 1 - \frac{n_a}{2n_m}.$$

В соответствии с приведенным соотношением вместо n_m может быть задана кратность тока K .

Параметры СЭП с НЭ и АБ выбираются исходя из частоты прокручивания коленвала двигателя внутреннего сгорания n , представляющей среднюю частоту вращения коленвала электростартером при питании его от АБ или НЭ. Эта частота вращения считается постоянной за все время прокручивания коленвала ДВС, а при питании от НЭ, когда частота вращения изменяется от $2n$ до нуля, средняя частота: $N_{\text{ср}} = \frac{2n}{R}$. Расчетной в этом случае является максимальная частота в начале прокручивания $2n$.

Рассматривая стационарный режим, можно считать, что для преодоления постоянного момента сопротивлением M_c требуется постоянный электромагнитный момент M и соответствующий постоянный ток I_a в цепи электростартерного двигателя. Напряжение на конденсаторе НЭ определяется известным соотношением:

$$U_{\text{не}} = U_{\text{нЭн}} - \frac{I}{C_{\text{нЭ}}} \int_0^t I_a dt,$$

где: $C_{\text{нЭ}}$ – емкость НЭ,

$U_{\text{нЭн}}$ – начальное напряжение на конденсаторе.

После интегрирования получаем:

$$U_{не} = U_{ннн} - \frac{I_a}{C_{нэ}} t.$$

Так как начальное напряжение на конденсаторе должно быть равно напряжению бортовой сети U_n , то в окончательном виде выражение для напряжения НЭ примет вид:

$$U_{не} = U_n - \frac{I_a}{C_{нэ}} t.$$

Для решения задачи анализа пуска ДВС необходимо знать пусковую характеристику $t_n = f(n)$, представляющую собой зависимость времени пуска от средней частоты вращения. Подобные характеристики получают экспериментально для разных температур пуска.

Систему пуска двигателя внутреннего сгорания, включающую электрическую схему и собственно двигатель, можно представить в виде объекта, имеющего серию входных и выходных параметров. Если через x_1, \dots, x_m обозначим числа, характеризующие входы рассматриваемой системы, то можно всю совокупность входных воздействий представить в виде многомерного вектора:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m).$$

В качестве входных параметров могут быть различные сопротивления в цепи стартерного электродвигателя, частота вращения, долговечность, надежность и т.д.

Аналогично можно говорить о выходном многомерном векторе:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n),$$

где: y_1, y_2, \dots, y_n – соответствующие выходные параметры исследуемой системы.

В соответствии с принятыми обозначениями можно выразить математически связь выходного вектора со входными через оператор трансформации Φ :

$$Y = \Phi(X).$$

Преобразование вектора X в вектор Y можно выразить в виде системы уравнений:

$$\Delta y_1 = a_{11}\Delta x_1 + a_{12}\Delta x_2 + \dots + a_{1m}\Delta x_m,$$

$$\Delta y_2 = a_{21}\Delta x_1 + a_{22}\Delta x_2 + \dots + a_{2m}\Delta x_m,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\Delta y_n = a_{n1}\Delta x_1 + a_{n2}\Delta x_2 + \dots + a_{nm}\Delta x_m.$$

В этих уравнениях коэффициенты вида a_{ij} образует матрицу:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}.$$

Эта система выражается векторным уравнением:

$$\Delta Y = A \Delta X.$$

Если вектор X – непрерывная величина, то оба предыдущие выражения – дифференциальные. Решение этих уравнений состоит из системы функций:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

$$y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$y_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

таких, что

$$a_{ij} = \frac{df_i}{dx_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m).$$

Если есть решение и можно получить значение выходного многомерного вектора Y то можно решить вопрос о нахождении его внутри многомерной области A_{opt} . Таким образом решается вопрос о выполнении заданных условий оптимизации.

В этом случае, если рассматривать входные величины не фиксированными, а изменяющимися в некоторых пределах, то входной вектор будет занимать какую-то многомерную область A_x , которая в свою очередь может быть трансформирована в многомерную область выходных системы. Тогда можно провести анализ насколько области выходных параметров перекрывают область A_{opt} , что позволит решить вопрос о преимуществе той или иной системы.

Основная трудность решения задачи анализа системы электростартерного пуска подоб-

ным образом заключается в сложности установления функциональных зависимостей между входными и выходными параметрами.

С этой точки зрения на начальном этапе анализа и сравнения СЭП с различными источниками электропитания имеет смысл выбрать один или ограниченное количество выходных параметров, по которым можно проводить такое сравнение.

Кратность рабочего тока для СЭП с НЭ может, как уже указывалось, быть определена по формуле: $K = 1 - \frac{n_i}{n_m}$.

Кратность рабочего тока для СЭП с аккумуляторной батареей: $K_{аб} = \frac{1+K}{2}$.

Требуемая энергия НЭ может быть определена соотношением:

$$W_{НЭ} = \frac{Pt_n}{(1-K)^2}.$$

Требуемая энергия при использовании в качестве источника электропитания аккумуляторной батареи:

$$W_{АБ} = \frac{2Pt_n}{1-K}.$$

Приведенные соотношения позволяют получить один из выходных параметров – отношение энергий для системы с НЭ и АБ:

$$\frac{W_{НЭ}}{W_{АБ}} = \frac{1}{2(1-K)}.$$

Как видно из формулы, это отношение определяется только кратностью тока K .

Суммарное сопротивление цепи электростартера в системе с емкостным накопителем энергии, которое может обеспечить необходимые параметры по частоте вращения и мощности в начальный период прокручивания ДВС:

$$R_{a\Sigma НЭ} = \frac{U_H^2(1-K)K}{2P}.$$

Емкость НЭ:

$$C_{НЭ} = \frac{2Pt_n}{U_H^2(1-K)^2}.$$

Сопротивление НЭ:

$$R_{НЭ} = \frac{U_H^2(1-K)^2\tau_{НЭ}}{2Pt_n}.$$

Сопротивление цепи электростартера:

$$R_{ст} = R_{a\Sigma НЭ} - R_{НЭ}.$$

После подстановки значений сопротивлений получим:

$$R_{ст} = \frac{U_H^2(1-K)K}{2P} \left(1 - \frac{1-K}{K} * \frac{\tau_{НЭ}}{t_n}\right).$$

Представляет определенный интерес отношение сопротивления НЭ к суммарному сопротивлению цепи питания стартеров с СЭП с НЭ:

$$\frac{R_{НЭ}}{R_{a\Sigma НЭ}} = \frac{1-K}{K} * \frac{\tau_{НЭ}}{t_n}.$$

Суммарное сопротивление цепи питания при использовании в качестве источника АБ определяется как:

$$R_{a\Sigma НЭ} = \frac{U_H^2(1-K^2)}{4P}.$$

Отношение суммарных сопротивлений для цепи питания при питании от НЭ и АБ:

$$\frac{R_{a\Sigma НЭ}}{R_{a\Sigma АБ}} = \frac{2K}{1+K}.$$

Как видно, это отношение определяется также, как отношение энергий, только величиной кратности тока K .

Отношение сопротивлений стартера и суммарного сопротивления в системе с питанием от АБ:

$$\frac{R_{ст}}{R_{a\Sigma АБ}} = \frac{2K}{1+K} \left(1 - \frac{1-K}{K} * \frac{\tau_{НЭ}}{t_n}\right).$$

Сопротивление АКБ определяется соотношением:

$$R_{AB} = \frac{U_H^2(1-K^2)}{4P} \left(1 + \frac{2\tau_{HЭ}}{t_n}\right).$$

Соответственно, можно найти отношение сопротивления аккумуляторной батареи к суммарному сопротивлению электрической цепи в системе пуска ДВС:

$$\frac{R_{AB}}{R_{a\Sigma AB}} = \frac{1-K}{1+K} \left(1 + \frac{2\tau_{HЭ}}{t_n}\right).$$

Удельную энергию $w_{HЭ}$, зная которую можно определить объем самого емкостного накопителя, обеспечивающего пуск ДВС:

$$V_{HЭ} = \frac{W_{HЭ}}{w_{HЭ}} = \frac{Pt_n}{(1-K)^2 w_{HЭ}}.$$

Отношение удельных энергий АБ и НЭ:

$$\frac{V_{HЭ}}{V_{AB}} = K_v \frac{w_{AB}}{w_{HЭ}}.$$

Максимальные электромагнитные мощности для систем электропривода с АБ и НЭ могут быть определены по формулам:

$$P_{mAB} = \frac{P}{1-K^2}; P_{mHЭ} = \frac{P}{2(1-K)K}.$$

Вращающий момент в расчетном режиме:

$$M = \frac{30P}{\pi i n} = \left(\frac{K_M}{U_H}\right) U_H I_a,$$

где: K_M – коэффициент пропорциональности.

Представляет определенный интерес проследить влияние выбранной средней частоты вращения коленвала двигателя n_{cp} во время пуска ДВС на основные выходные параметры СЭП.

В качестве базового двигателя внутреннего сгорания был выбран двигатель ВАЗ 1119 с инжекторной системой впрыска, для которого имелись экспериментальные зависимости времени пуска t_n и момента сопротивления M_c от средней частоты вращения n_{cp} .

Так, сложнее производить пуск при отрицательных температурах, исходной для расчетов принята температура $t_{эп} = -20^{\circ}\text{C}$. При расчетах использовались следующие характеристики двигателя: объем цилиндров $V_H = 1,6$ л. (1590 см³), передаточное отношение $i = 11,62$.

Характеристики систем электростартерного пуска соответствуют средним значениям достигнутого уровня по удельным показателям:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| • удельная энергия емкостного накопителя энергии | $w_{HЭ} = 1$ Дж/см ³ , |
| • удельная энергия аккумуляторной батареи | $w_{AB} = 210$ Дж/см ³ , |
| • степень разреженности аккумуляторной батареи | $\Delta C_p = 25\%$, |
| • порядковый номер попытки пуска | $Z_p = 3$, |
| • номинальная емкость | $\Delta C_{20} = 15$ АЧ, |
| • КПД передачи | $\eta_{пер} = 0,85$, |
| • электромагнитный КПД | $\eta_{эм} = 1$, |
| • частота вращения | $n_m = 1620$ мин. ⁻¹ , |
| • постоянная времени НЭ | $\tau_{эм} = 0$, |
| • номинальное напряжение | $U_H = 12$ В. |

Проведённые расчёты показывают, что с ростом частоты вращения $n_{m HЭ}$ растут, как энергии $w_{HЭ}$ и w_{AB} так и объёмы $V_{HЭ}$ и V_{AB} , источников тока. Зависимость $R_{a\Sigma HЭ} = f(n_{m HЭ})$ имеет экстремум при частоте вращения $n_{m HЭ}$ в районе 1600 мин.⁻¹.

Литература

1. Водорезов С.В., Квайт С.М., Малеев Р.А., Чижков Ю.П. Исследования процессов прокручивания двигателей внутреннего сгорания системой электростартерного пуска с емкостным накопителем энергии. Деп. В ЦНИИТЭИ Автопроме 11.12.89 г. № 1966 – ап. 89.
2. Чижков Ю.П., Малеев Р.А., Меркулов Р.В., Седькин И.В. Определение основных параметров системы электростартерного пуска для автомобильного двигателя с емкостными накопителями энергии // Сб. научных трудов МАМИ: Электрическое и электронное обо-

рудование автомобилей, тракторов и их роботизированных производств. – М.: МАМИ, 1992, - с. 101-105.

3. Tom Denton Automobile Electrical and Electronic Systems.// Associate Lecturer, Open University. - 2010, - с 110-127.

Анализ обледенения проточной части транспортных турбокомпрессоров

Мартьянов О.А., д.т.н. проф. Меркулов В.И.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1054

Аннотация. В статье содержится обзор возможных последствий обледенения проточной части транспортных турбокомпрессоров, работающих на влажном воздухе, с указанием проблемных участков, подвергающихся разрушению в процессе работы.

Ключевые слова: транспортный турбокомпрессор, обледенение.

Практика эксплуатации быстроходных турбокомпрессоров, выступающих в роли расширительных машин (турбодетандеров) показала, что влажный воздух приводит в определенных условиях к обледенению проточной части турбины турбокомпрессора, что вызывает разрушение рабочих лопаток. Проблемами работы турбокомпрессоров, работающих на влажном воздухе, в разные периоды времени занимались: П.Л. Капица, Д.И. Плачендовский, В.И. Ардашев.

На рисунке 1 отмечены зоны, в которых происходит разрушение.

Зона 1 характеризуется наличием свободной влаги, создающей капельный вихрь на кончиках колеса, что приводит к эрозионному воздействию на сопловой аппарат (СА), вызывая разрушение лопаток, как колеса турбины, так и СА.

Зона 2 характеризуется наличием твердой фазы на выходе из колеса турбины, что создает механическое воздействие на основание колеса, что в свою очередь приводит к его разрушению, вызывает низкочастотную вибрацию, снижает КПД, вызывает рост температуры на выходе из турбины. Является источником ледяных пробок в системе.

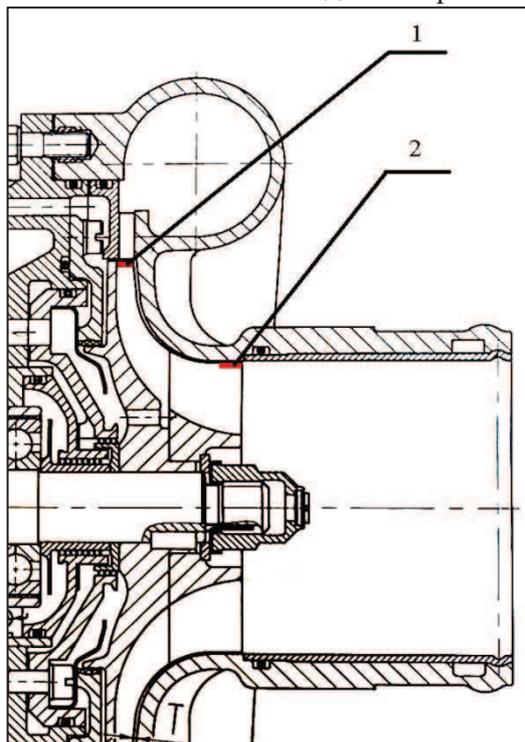


Рисунок 1. Зоны ТК, подверженные разрушению