

Методика расчета системы электростартерного пуска с аккумуляторной батареей и емкостным накопителем энергии

к.т.н. доц. Малеев Р.А., Шматков Ю.М.
Университет машиностроения
495-223-05-23, доб. 1574

Аннотация. В статье представлена разработанная на кафедре «Автотракторное электрооборудование» Университета машиностроения методика расчета систем электростартерного пуска с комбинированным источником тока. Представлены исходные данные и основные формулы и выражения для расчета таких систем и определения основных энергетических параметров.

Ключевые слова: система электростартерного пуска, комбинированный источник тока, стартерный электродвигатель

В результате проведения научно-исследовательских работ на кафедре «Автотракторное электрооборудование» по исследованию процесса пуска двигателя внутреннего сгорания и питания электростартера от совместно работающих емкостного накопителя энергии (НЭ) и аккумуляторной батареи (АБ) были выведены формулы для расчета значений напряжений и токов накопителя энергии и аккумуляторной батареи, ЭДС и частоты вращения якоря стартерного электродвигателя, а также полезной мощности на валу стартерного электродвигателя.

Анализ полученных формул показывает, что при подключении накопителя энергии параллельно аккумуляторной батарее при постоянстве полезного момента возрастают средние частоты вращения якоря стартерного электродвигателя и его полезная мощность. В результате этого повышается надежность пуска ДВС в условиях низких температур.

Разработаны выражения, позволяющие определить основные энергетические параметры системы электростартерного пуска (СЭП) при параллельной работе АБ и НЭ и формула для расчета емкости накопителя, которая определяется из требуемой механической энергии, необходимой для вращения вала ДВС с заданной пусковой частотой вращения.

Приведенная методика расчета позволяет с достаточной точностью рассчитывать параметры СЭП с комбинированным источником тока (КИТ).

Исходные данные для расчета СЭП с КИТ.

Двигатель внутреннего сгорания – ДВС.

1. Марка, код.
2. Моторное масло (сорт, марка).
3. Расчетная температура пуска ДВС - T^0 С.
4. Вязкость масла при T - ν , мм г/с.
5. Число зубьев маховика Z_m или передаточное число привода стартера – u .
6. Экспериментальные зависимости $M_c = f(n_{cp})$ в табличной форме. Характеристики $M_c = f(n_{cp})$ могут быть расчетными (по эмпирическим формулам РТМ).
7. Пусковые характеристики ДВС $t_n = f(n_{cp})$ в табличной форме.
8. КПД передачи от СЭ к ДВС - $\eta_{пер}$.
9. Частоты вращения вала ДВС, для которых строятся зависимости параметров СЭП от t - n_{cp1} , n_{cp2} (например, n_{min} по времени пуска $t_n = 10; 15$ с; n_{min} по ОСТ 37.001.052-87).
10. Число цилиндров двигателя $Z_{ц}$.
11. Число тактов двигателя $\tau_{ог}$ (тактность).

Аккумуляторная батарея – АБ.

1. Тип, марка, код (если АБ задана).
2. Номинальное напряжение - U_n , В.
3. Удельная энергия АБ по объему - $w_{абv}$, Дж/см³.
4. Удельная энергия АБ по массе - $w_{абm}$, Дж/кг.

5. Отношение массы АБ к ее номинальной емкости $K_{абм} = m_{аб} / C_{20}$, кг/А·ч.
6. Номинальная емкость АБ (если АБ задана) - $/C_{20}$, А×ч.
7. Масса АБ (если АБ задана) - $m_{аб}$, кг.
8. Объем АБ (если АБ задана) - $V_{аб}$, см³.
9. Начальное разрядное напряжение $U_{нр}$ (может быть задано по РТМ или рассчитано по формулам Ю.И.Боровских).
10. Сила тока короткого замыкания - $I_{кз}$ (может быть задано или рассчитано по формулам Ю.И.Боровских).
11. Сила тока короткого замыкания на одну положительную пластину - $I_+ = I_{кз} / n_+$, А·ч.
12. Номинальная емкость АБ, отнесенная к одной положительной пластине - $C_{20+} = C_{20} / n_+$, А×ч.
13. Односторонняя площадь электрода АБ - $S_э$, м².
14. Толщина положительного электрода - δ , м.
15. Расчетная степень разряженности АБ - $\Delta C_{ср}$, %.
16. Коэффициент, учитывающий падение тока I_+ с каждой попытки пуска - $K_п$.
17. Коэффициенты $C_п$, $b_п$, $c_п$ в формуле для расчета тока I_+ .
18. Расчетное число попыток пуска в формуле для расчета тока I_+ - $Z_п$.

Емкостной накопитель энергии (конденсатор) – НЭ.

1. Номинальное напряжение НЭ - $U_{нэдз}$, В.
2. Допустимое по ТУ на НЭ напряжение заряда - $U_{нэдз}$, В.
3. Удельная энергия НЭ по объему $w_{нэв}$, Дж/см³.
4. Удельная энергия НЭ по массе $w_{нэм}$, Дж/кг.
5. Постоянная времени НЭ - $\tau_{нэ} = C_{нэ} \times R_{нэ}$ при заданной T , °С (должна быть зависимость $\tau_{нэ}$ (или $R_{нэ}$) от T , °С).
6. Емкость накопителя энергии - $C_{нэ}$, Ф (если задан НЭ).
7. Сопротивление накопителя энергии - $R_{нэ}$, Ом (если задан НЭ).
8. Напряжения начала разряда, для которых строятся зависимости параметров СЭП от времени t и частоты вращения $n_{ср}$ - $U_{нэон1} < U_{нэон2} < U_{нр}$; $U_{нэон3} = U_{нэон2}$.

Стартерная цепь.

1. Сопротивление стартерной сети - $R_{пр}$, Ом (принимается $R_{пр}=0,002$ Ом или задается другое значение заказчиком).
2. Масса провода $m_{пр} = V_{пр} \cdot I_{пр} \cdot \gamma_{пр}$ или задается конкретное значение.
3. Падение напряжения на диодах в цепи между АБ и НЭ - ΔU_d , В.

Электростартер.

1. Тип, код.
2. Номинальное напряжение U_n , В (должно быть равно номинальному напряжению АБ).
3. Рабочие характеристики электростартера - $U_{сто}$, P_{20} , M_2 , $n_{ао} = f(I_a)$ в табличной форме.
4. Сопротивление стартера - $R_{ст}$, Ом.
5. Число зубьев шестерни привода - $Z_{ш}$.
6. Масса стартера - $m_{ст}$, кг.

Последовательность расчета СЭП с КИТ

Задаемся частотами вращения n с интервалом 10 мин^{-1} (можно 5 или 20 мин^{-1}) - $\Delta n_{ср}$; $n_{ср} = n_{ср} + \Delta n_{ср}$ от $n_{ср} = 30$ до $n_{ср} = 150 \text{ мин}^{-1}$ для бензиновых двигателей и от 50 до 250 мин^{-1} для дизелей. Если на графиках $M_c = f(n_{ср})$ и $t_n = f(n_{ср})$ не хватает данных (ограничены $n_{ср}$), то нужна аппроксимация.

Для n_{cp} по зависимостям $M_c = f(n_{cp})$ определяем M_c , Н·м, затем для n_{cp} по зависимостям $t_n = f(n_{cp})$ определяем t_n , с.

По известной методике [1] находим энергию W_{nt_n} , требуемую для вращения вала ДВС с частотой n_{cp} в течение времени t_n ; вращающий момент на валу СЭ M_2 ; силу тока якоря I_a , А в расчетном рабочем режиме по зависимостям $M_2 = f(I_a)$ СЭ при моменте M_2 ; требуемую расчетную частоту вращения якоря СЭ n_{acr} ; частоту вращения якоря СЭ на исходных рабочих характеристиках при расчетном значении силы тока якоря $I_a - n_{ao}$, (по зависимости $n_{ao} = f(I_a)$); напряжение на выводах СЭ при силе тока I_a на исходных рабочих характеристиках - U_{cmo} (зависимости $U_{cmo} = f(I_a)$), ЭДС в обмотке якоря в рабочем режиме на исходных рабочих характеристиках E_{ao} ; ЭДС в обмотке якоря, необходимая для вращения якоря с частотой n_{acr} E_{ap} ; электромагнитную мощность СЭ, требуемая для вращения якоря СЭ с частотой n_{acr} P_{cp} ; полезную мощность на валу СЭ, требуемая для вращения якоря с частотой n_{acr} P_{2cp} ; среднее значение электромагнитного КПД $\eta_{эмп}$; полную механическую энергию СЭ за время t_n $W_{мехп}$; минимально допустимое напряжение заряда НЭ в КИТ $U_{нэо min}$

Далее определяются следующие параметры:

Постоянная времени КИТ $\tau_2 = C_{нэ}(R_{аб} + R_{нэ}) = C_{нэ}R_{аб} + \tau_{нэ}$ для условия $U_{нэон} = U_{нэон max} = U_n + I_a \cdot R_{нэ}$, т.е. когда АБ и НЭ в КИТ работают еще совместно, решая следующее равенство:

$$\frac{\tau(1 - e^{-t_n/\tau}) - t_n e^{-t_n/\tau}}{1 - e^{-t_n/\tau}} = \frac{W_{мех}}{U_{нр}I_a - I_a^2(R_{нр} + R_{см})} < t_n, \quad (1)$$

где: τ может изменяться от 0 до ∞ , но использовать значения τ свыше 10000 нецелесообразно.

Сопротивление АБ при $U_{нэон max}$:

$$R_{аб} = \frac{[U_n \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_{нр} + R_{см})] \cdot t_n - W_{мехп}}{I_a^3 \cdot [t_n - \tau \cdot (1 - e^{-t_n/\tau})]}, \text{ Ом.} \quad (2)$$

Емкость НЭ при $U_{нэон max}$:

$$C_{нэ} = \frac{\tau - \tau_{нэ}}{R_{аб}}, \text{ Ф.} \quad (3)$$

Сопротивление НЭ для $U_{нэон max}$:

$$R_{нэ} = \tau_{нэ} / C_{нэ}, \text{ Ом.} \quad (4)$$

Максимальное расчетное напряжение заряда НЭ (по условию $U_{нэон} < U_n + I_a R_{нэ}$):

$$U_{нэон max} = U_{нр} + I_a \cdot R_{нэ}, \text{ В.} \quad (5)$$

Время до остановки СЭ

$$t_k = -\tau \cdot \ln \frac{I_a \cdot (R_{аб max} + R_{нр} + R_{см}) - U_{нр}}{(U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб max}) \cdot \frac{\tau - \tau_{нэ}}{\tau}}, \text{ с.} \quad (6)$$

Напряжение на выводах НЭ при отключенной нагрузке:

$$U_{нэо} = U_{нр} - I_a \cdot R_{аб} + (U_{нэон} - U_n + I_a \cdot R_{аб}) \cdot e^{-t_n/\tau}, \text{ В.} \quad (7)$$

Сила тока НЭ:

$$i_{нэ} = \frac{U_{нэо} - U_n + I_a \cdot R_{аб}}{R_{аб} + R_{нэ}} \cdot e^{-t_n/\tau}, \text{ А.} \quad (8)$$

Сила тока АБ:

$$i_{аб} = I_a - \frac{U_{нэо} - U_n + I_a \cdot R_{аб}}{R_{аб} + R_{нэ}} \cdot e^{-t_n/\tau}, \text{ А.} \quad (9)$$

Напряжение на выводах КИТ (текущее значение):

$$U_{нэо} = U_{нр} - I_a \cdot R_{аб} + (U_{нэон} - U_{н} + I_a R_{аб}) \cdot \frac{\tau - \tau_{нэ}}{\tau} \cdot e^{-t/\tau}, B. \quad (10)$$

ЭДС в обмотке якоря СЭ:

$$e_a = U_{н} - I_a \cdot (R_{аб} + R_{нр} + R_{см}) + (U_{нэон} - U_{н} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \frac{\tau_2 - \tau_{нэ}}{\tau_2} \cdot e^{-t/\tau_2}, B. \quad (11)$$

Время до остановки СЭ ($t_k \leq t_n \leq \infty$):

$$t_k = -\tau \cdot \ln \frac{I_a \cdot (R_{аб} + R_{нр} + R_{см}) - U_{нр}}{(U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \frac{\tau - \tau_{нэ}}{\tau}}. \quad (12)$$

Электромагнитная мощность СЭ:

$$P = U_{нр} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_{аб} + R_{нр} + R_{см}) + I_a \cdot (U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \frac{\tau - \tau_{нэ}}{\tau} \cdot e^{-t/\tau}, Bm. \quad (13)$$

Полная мощность АБ с учетом внутренних потерь:

$$P_{або} = U_{н} \cdot i_{аб} = U_{н} \cdot \left(I_a - \frac{U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}}{R_{аб} + R_{нэ}} \cdot e^{-t/\tau_2} \right), Bm. \quad (14)$$

Полная мощность НЭ с учетом внутренних потерь:

$$P_{нэо} = U_{нэо} \cdot i_{нэ} = \frac{(U_{нр} - I_a \cdot R_{аб}) \cdot (U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб})}{R_{аб} + R_{нэ}} \cdot e^{-t/\tau} + \frac{(U_{нэон} - U_{н} + I_a \cdot R_{аб})^2}{R_{аб} + R_{нэ}} \cdot e^{-2t/\tau_2}, Bm. \quad (15)$$

Полная мощность КИТ с учетом внутренних потерь:

$$P_{ито} = P_{або} + P_{нэо} = U_{нр} \cdot I_a - I_a \cdot (U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \frac{\tau - \tau_{нэ}}{\tau} \cdot e^{-t/\tau} + \frac{(U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб})^2}{R_{аб}} \cdot e^{-2t/\tau}, Bm. \quad (16)$$

Текущее значение механической работы:

$$W_{мех} = [U_{нр} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_{аб} + R_{нр} + R_{см}) \cdot t + I_a \cdot (U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot (\tau - \tau_{нэ}) \cdot (1 - e^{-t/\tau})], Дж. \quad (17)$$

Текущее значение энергии (работы) прокручивания вала ДВС за время t:

$$W_n = W_{мех} \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{эмср}, Дж. \quad (18)$$

Текущее значение КПД СЭП с КИТ за время t:

$$\eta_{сэп} = \frac{W_n}{W_{ито}}. \quad (19)$$

Текущее значение механического КПД (КПД преобразования электрической энергии в полную механическую работу, совершаемую СЭ) за время t:

$$\eta_{мех} = \frac{W_{мех}}{W_{ито}}. \quad (20)$$

Энергия НЭ на данный момент времени t:

$$W_{нэк} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{нэо}^2, Дж. \quad (21)$$

Энергия полностью заряженного НЭ до напряжения $U_{нэон}$:

$$W_{нэон} = 0,5 \cdot C_{нэ} \cdot U_{нэон}^2, Дж. \quad (22)$$

Угол поворота коленчатого вала ДВС за время t:

$$\theta = \frac{W_{п}}{M_c}, рад. \quad (23)$$

Число рабочих ходов:

$$N_{px} = \frac{\theta \cdot Z}{\pi \cdot \tau_{о6}}. \quad (24)$$

Средняя сила тока разряда АБ при работе в КИТ за время t :

$$I_{абср} = I_a - \frac{(U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \tau \cdot (1 - e^{-t_n/\tau})}{(R_{аб} + R_{нэ}) \cdot t}, A. \quad (25)$$

Допустимое время разряда АБ в КИТ током силой $I_{абср}$ (учитывается только разряд на СЭ при работе в КИТ, затраты энергии на заряд НЭ не учитываются):

$$t_p = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot \delta_+ \cdot S_+ \cdot n_+ \cdot (70 + 5 \cdot n_+ - 2 \cdot \Delta C_p)}{(e^{-(1,36+0,071 \cdot T)} + 1) \cdot I_{абср}^{1,46}}, c. \quad (26)$$

Число возможных попыток прокручивания вала ДВС продолжительностью t СЭП с КИТ по запасу энергии АБ (АБ работает только на разряд совместно с НЭ на СЭ):

$$Z_{II} = \frac{t_p}{t_n}. \quad (27)$$

$$\text{Кратность тока АБ ее номинальной емкости: } K_{\sigma} = \frac{I_{абср}}{C_{20}}. \quad (28)$$

Далее для различных значений $n_{ср}$ и $U_{нэон}$ строятся зависимости от времени (от $t = 0$ до $t = t_k$) всех расчетных параметров СЭП с КИТ.

Вывод

Данная методика расчета СЭП с КИТ дает возможность с достаточной точностью определить основные параметры СЭП. Формулы для определения основных параметров СЭП с КИТ позволяют провести сравнительный анализ с другими системами пуска.

Литература

1. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска авто-тракторных двигателей. - М., Машиностроение, 1990.- с.256.: ил.

Анализ методов расчета и моделирования электродвигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

Розин П.А., к.т.н. доц. Акимов А.В., Кудинова Л.А.
Университет машиностроения
(495) 223-05-29, ate@mami.ru

Аннотация. Рассмотрены основные методы расчета двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Показано, что наиболее точные данные по характеристикам двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов могут быть получены путем моделирования их магнитных полей и электрических процессов в обмотках. Дан сравнительный анализ возможных методов их моделирования.

Ключевые слова: электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, методы моделирования, метод конечных элементов, метод граничных элементов

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам электродвигатель с постоянными магнитами, широко используется в исполнительных механизмах, включая исполнительные механизмы автомобилей, а также является наиболее перспективными в диапазоне малых и средних мощностей. Он не имеет потерь на возбуждение, обладает высокой стабильностью скорости ротора и высокими пусковыми моментами. Эти качества выделяют его из ряда всех остальных машин и обеспечивают применение в качестве электростартера, а также в системах, где стабильность скорости является первостепенным требованием, предъявляемым к исполнительному механизму. Поэтому проблему их расчета можно рассматри-