

ФОРМИРОВАНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Канд. техн. наук, доц. ГУЛЬКОВ Г. И.,
канд. техн. наук ГУЛЬКОВ А. Г.

Белорусская государственная политехническая академия

Канд. техн. наук ШАИБИ Р.

Университет имени Мулюд Моммери (Алжир)

В тяговом электроприводе (ЭП) электромобиля целесообразно использовать электродвигатели с высоким отношением пускового момента M_n к моменту инерции двигателя J . Лучшие показатели по данному критерию имеют бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) с магнитами Nd-Fe-B.

Основной характеристикой электромобиля является тяговая характеристика. В случае питания от аккумуляторной батареи ее можно выразить

$$F = \frac{P_{\text{АБн}} \eta_{\Sigma}}{v}, \quad (1)$$

где F – тяговое усилие;

$P_{\text{АБн}}$ – номинальная мощность аккумуляторной батареи;

η_{Σ} – коэффициент полезного действия ЭП;

v – скорость движения.

Для выполнения зависимости (1) необходимо реализовать механическую характеристику электродвигателя

$$\omega = \frac{P_n}{M}, \quad (2)$$

где ω , M – угловая скорость и момент двигателя соответственно;

P_n – номинальная мощность двигателя, что соответствует регулированию скорости двигателя с постоянством мощности.

В [2] предложен метод формирования механической характеристики БДПТ, обеспечивающий заданное приближение к идеальной путем переключения секций фазных обмоток. Такой метод не рационален, так как для переключения секций требуются дополнительные устройства коммутации и управления.

Для БДПТ механические характеристики, близкие к линии постоянной механической мощности, достаточно просто могут быть получены в системе автоматического регулирования (САР) тока двигателя. Управление в таком случае производится водителем, осуществляющим задание тока на входе регулятора тока (РТ).

Для определения параметров САР тока осуществим аппроксимацию характеристики $\omega = P_n / M$ прямой линией $\omega_1 = b - kM$ (рис. 1).

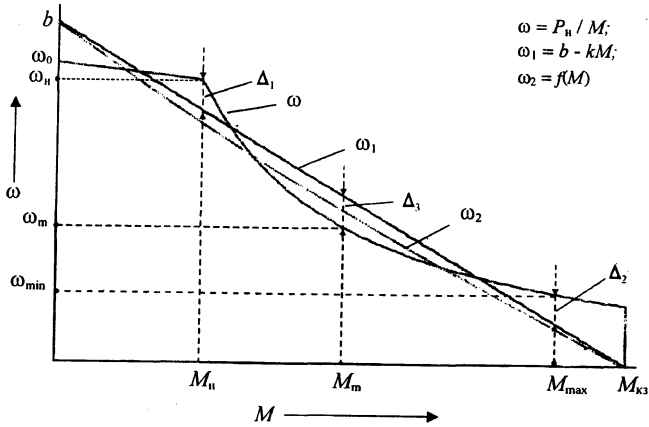


Рис. 1. Механические характеристики тягового электропривода

Для аппроксимации выбран метод наилучшего приближения Чебышева, согласно которому отклонения $\Delta = \omega - \omega_1$ на краях и в середине промежутка аппроксимации должны быть равны [3].

Отклонение в начале промежутка аппроксимации (рис. 1)

$$\Delta_1 = \omega_n - (b - kM_n) = \frac{P_n}{M_n} - (b - kM_n), \quad (3)$$

где ω_n, M_n – номинальные значения угловой скорости и момента двигателя соответственно.

Отклонение в конце промежутка

$$\Delta_2 = \omega_{\min} - (b - kM_{\max}) = \frac{P_n}{M_{\max}} - (b - kM_{\max}) = \frac{P_n}{m_n M_n} - (b - km_n M_n), \quad (4)$$

где M_{\max} – максимальный момент двигателя;

ω_{\min} – угловая скорость, соответствующая моменту M_{\max} ;

$m_n = M_{\max} / M_n$.

В середине промежутка аппроксимации

$$\Delta_3 = (b - kM_m) - \frac{P_n}{M_m}, \quad (5)$$

где M_m – момент в середине промежутка аппроксимации.

Значение момента M_m , соответствующего максимальной погрешности внутри промежутка аппроксимации, определим из условия $\frac{d\Delta_3}{dM_m} = 0$.

Продифференцируем (5) и получим

$$M_m = \sqrt{\frac{P_H}{k}}. \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (5) примет следующий вид:

$$\Delta_3 = (b - k\sqrt{\frac{P_H}{k}}) - P_H\sqrt{\frac{k}{P_H}} = b - 2\sqrt{kP_H}. \quad (7)$$

Учитывая, что $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta = \omega_H - (b - kM_H); \\ \Delta = \frac{\omega_H}{m_n} - (b - km_nM_H); \\ \Delta = b - 2\sqrt{kP_H}. \end{cases}$$

В результате решения данной системы получены формулы для расчета коэффициентов k и b :

$$k = \frac{\omega_H}{m_n M_H}; \quad (8)$$

$$b = \frac{\omega_H}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{m_n}} + 1 \right)^2. \quad (9)$$

Вид РТ и его параметры, а также коэффициент обратной связи по току определяются в результате синтеза САР тока. Структурная схема контура тока тягового ЭП на базе БДПТ представлена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: $U_{зт}(p)$ – операторное изображение (ОИ) напряжения задания тока двигателя $u_{зт}$; $k_{РТ}$ – передаточная функция (ПФ) регулятора тока; $U_y(p)$ – ОИ напряжения управления u_y ; $U_{я}(p)$ – ОИ напряжения на выходе преобразователя $U_{я}$; $E_{я}(p)$ – ОИ ЭДС вращения двигателя $e_{я}$; $k_{дт}$ – коэффициент обратной связи по току; $\Delta U_{хя}(p)$ – ОИ эквивалентного падения напряжения, учитывающего влияние коммутации на механическую характеристику двигателя; $I_{я}(p)$ – ОИ тока двигателя $i_{я}$; β_n – коэффициент передачи преобразователя; T_0 – постоянная времени преобразователя; L_σ – индуктивность фазы статора; R – активное сопротивление фазы статора.

На основании данной структурной схемы (рис. 2) запишем операторное уравнение контура регулирования тока

$$\begin{aligned} [U_{зт}(p) - k_{дт}I_{я}(p)]k_{РТ}(p)\beta_n - [E_{я}(p) + \Delta U_{хя}(p)][T_0p + 1] = \\ = I_{я}(p)[2L_\sigma p + 2R][T_0p + 1] \end{aligned} \quad (10)$$

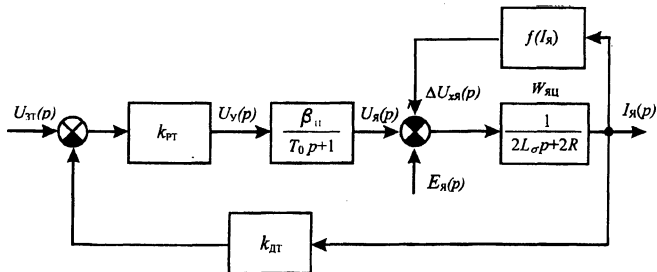


Рис. 2

Для установившегося режима ($p = 0$) из (10) получим

$$E_{я} = U_{зт} k_{рТ} \beta_{н} - k_{дТ} k_{рТ} \beta_{н} I_{я} - \Delta U_{хя}(I_{я}) - 2R I_{я}. \quad (11)$$

С учетом того, что $E_{я} = C \omega$, $M = C I_{я}$, где C – коэффициент пропорциональности. Из (11) получим выражение механической характеристики $\omega_1 = f(M)$ в замкнутой системе

$$\omega_1 = \frac{U_{зт} k_{рТ} \beta_{н}}{C} - \frac{\Delta U_{хя}(I_{я})}{C} - \frac{k_{дТ} k_{рТ} \beta_{н} + 2R}{C^2} M. \quad (12)$$

Выражение (12) является нелинейным, и его реализация требует применения нелинейного РТ, что значительно усложняет САР тока. Для упрощения вида РТ пренебрежем влиянием эквивалентного падения напряжения $\Delta U_{хя}(I_{я})$. В результате (12) принимает вид

$$\omega_1 = \frac{U_{зт} k_{рТ} \beta_{н}}{C} - \frac{k_{дТ} k_{рТ} \beta_{н} + 2R}{C^2} M. \quad (13)$$

Сопоставив уравнение $\omega_1 = b - kM$ с (13) с учетом (8) и (9) при $U_{зт} = U_{зт \max}$ получим:

$$\frac{U_{зт \max} k_{рТ} \beta_{н}}{C} = b = \frac{\omega_{н}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{m_{н}}} + 1 \right)^2; \quad (14)$$

$$\frac{k_{дТ} k_{рТ} \beta_{н} + 2R}{C^2} = k = \frac{\omega_{н}}{m_{н} M_{н}}. \quad (15)$$

Выражение для расчета $k_{рТ}$ получено из (14)

$$k_{рТ} = \frac{\omega_{н}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{m_{н}}} + 1 \right)^2 \frac{C}{U_{зт \max} \beta_{н}}, \quad (16)$$

а для расчета $k_{дт}$ – из (15)

$$k_{дт} = \frac{\omega_n C^2}{m_n M_n k_{рТ} \beta_n} - \frac{2R}{k_{рТ} \beta_n}. \quad (17)$$

Из (13) можно получить значение момента короткого замыкания $M_{кз}$ в замкнутой системе (рис. 1)

$$M_{кз} = \frac{U_{зт \max} k_{рТ} \beta_n C}{k_{дт} k_{рТ} \beta_n + 2R}. \quad (18)$$

Реализованная по (16) и (17) САР тока не учитывает влияния эквивалентного падения напряжения $\Delta U_{хя}(I_я)$ (рис. 2). В результате двигатель будет работать на характеристике $\omega_2 = f(M)$ (рис. 1), проходящей ниже характеристики $\omega_1 = f(M)$. Устранить влияние $\Delta U_{хя}(I_я)$ можно применением компенсирующего сигнала $U_{зтх}$ на входе преобразователя (рис. 3)

$$U_{зтх} = \frac{\Delta U_{хя}(I_я)}{\beta_n k_{рТ}}.$$

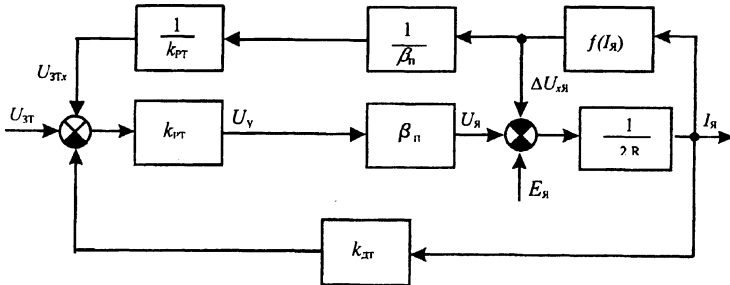


Рис. 3. Структурная схема контура тока САР тягового электропривода для установившегося режима с применением компенсирующего сигнала

Для расчета величины $U_{зтх}$ определим зависимость $\Delta U_{хя} = f(I_я)$. На основании структурной схемы на рис. 2 для установившегося режима запишем

$$\Delta U_{хя}(I_я) = U_я(I_я) - 2RI_я - C\omega(I_я). \quad (19)$$

Как следует из (19), для того чтобы рассчитать характеристику $\Delta U_{хя} = f(I_я)$ необходимо предварительно определить зависимости $U_я = f(I_я)$ и $\omega = f(I_я)$. Согласно структурной схеме контура тока (рис. 2) для установившегося режима

$$U_{\text{я}}(I_{\text{я}}) = (U_{\text{зт}} - k_{\text{дт}} I_{\text{я}}) k_{\text{рТ}} \beta_{\text{п}}. \quad (20)$$

Функциональная зависимость $\omega = f(I_{\text{я}})$ получена на основании выражения механической характеристики БДПТ, приведенного в [2]

$$\omega = \omega_0 \left(\frac{\pi - \alpha_1}{\pi + \alpha_1} \right) - \frac{2RI_{\text{я}}}{C} \left(\frac{\pi}{\pi + \alpha_1} \right), \quad (21)$$

где

$$\alpha_1 = \text{tg}\varphi \ln \left[1 + \frac{3(1-\nu)}{1+\nu} \frac{1 - e^{\left(-\frac{\pi}{3}\text{ctg}\varphi\right)}}{2 - e^{\left(-\frac{\pi}{3}\text{ctg}\varphi\right)}} \right];$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{p_{\text{п}} \omega L_{\sigma}}{R};$$

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

В результате решения системы уравнений (19)–(21) можно построить кривую $\Delta U_{\text{хя}} = f(I_{\text{я}})$ при изменении тока $I_{\text{я}} = (0 \dots I_{\text{кз}})$ (где $I_{\text{кз}} = M_{\text{кз}}/C$) (рис. 4). Как видно, данная зависимость имеет нелинейный характер и для ее схемотехнической реализации необходим функциональный пре-

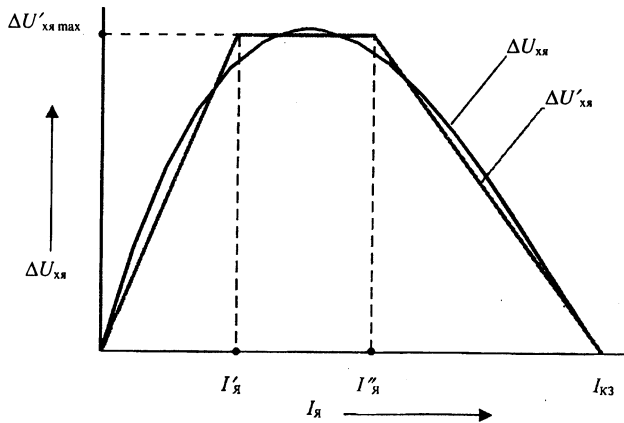


Рис. 4. Зависимость эквивалентного падения напряжения $\Delta U_{\text{хя}}$ в функции тока якоря $I_{\text{я}}$

образователь. Осуществим аппроксимацию кривой $\Delta U_{\text{хя}} = f(I_{\text{я}})$ ломаной $\Delta U'_{\text{хя}} = f(I_{\text{я}})$. В результате зависимость $\Delta U'_{\text{хя}} = f(I_{\text{я}})$ можно представить следующим образом:

$$\Delta U'_{\text{хя}} = \begin{cases} k_1 I_{\text{я}} & \text{при } I_{\text{я}} < I'_{\text{я}}; \\ \Delta U'_{\text{хя max}} & \text{при } I'_{\text{я}} \leq I_{\text{я}} \leq I''_{\text{я}}; \\ b' - k_2 I_{\text{я}} & \text{при } I_{\text{я}} > I''_{\text{я}}. \end{cases} \quad (22)$$

Коэффициенты наклона k_1 и k_2 :

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\Delta U'_{\text{хя max}}}{I'_{\text{я}}}; \\ k_2 = \frac{\Delta U'_{\text{хя max}}}{I_{\text{КЗ}} - I''_{\text{я}}}. \end{cases} \quad (23)$$

Значение b' определим из (22) при условии $I_{\text{я}} = I_{\text{КЗ}} (\Delta U'_{\text{хя max}} = 0)$

$$b' = k_2 I_{\text{КЗ}} = \frac{\Delta U'_{\text{хя max}}}{I_{\text{КЗ}} - I''_{\text{я}}} I_{\text{КЗ}}. \quad (24)$$

Уравнения (16)–(18) и (22) позволяют рассчитать коэффициент усиления РТ $k_{\text{РТ}}$, коэффициент обратной связи по току $k_{\text{дт}}$ и напряжение компенсации $U_{\text{зтх}}$.

По предложенной методике с использованием имитационной модели были получены механические характеристики $\omega_2 = f(M)$ (без компенсации влияния $\Delta U_{\text{хя}}(I_{\text{я}})$) (рис. 5) и $\omega_3 = f(M)$ (с компенсацией влияния $\Delta U_{\text{хя}}(I_{\text{я}})$). Для сравнения на рисунке также представлены графики функций $\omega = P_{\text{н}}/M$ и $\omega_1 = f(M)$.

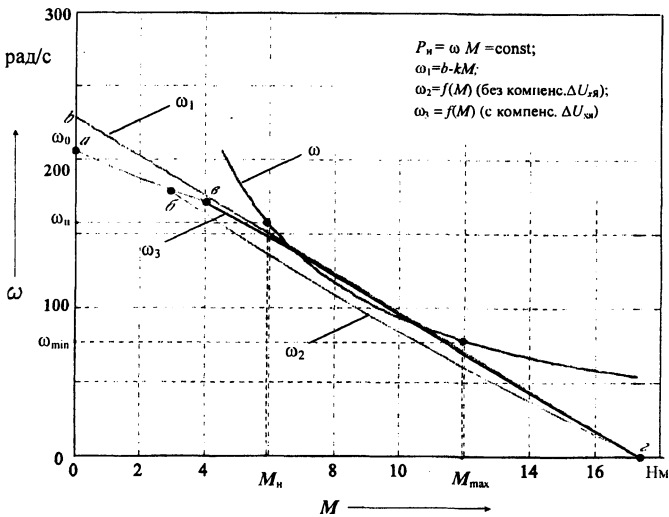


Рис. 5. Механические характеристики тягового ЭП на базе БДПТ в САР тока

В зависимости от того, применяется или не применяется компенсация $\Delta U_{\text{хя}}(I_{\text{я}})$, механическая характеристика ЭП проходит через точки a – b – $г$ или a – $б$ – $г$ соответственно. Участок a – $б$ является частью естественной механической характеристики двигателя, построенной по (21).

Механическая характеристика $\omega_2 = f(M)$, проходящая через точки $a-b-z$, состоит из двух участков: $a-b$ и $b-z$. Участок $b-z$, формируемый в результате действия РТ без применения компенсации $\Delta U_{хя}(I_я)$, проходит ниже прямой $\omega_1 = b - kM$ (рис. 5). Значения скоростей ЭП при этом во всем диапазоне изменения нагрузки значительно ниже, чем требуется.

Механическая характеристика $\omega_3 = f(M)$ проходит через точки $a-b-z$. Участок $b-z$ формируется в результате действия РТ и применения компенсации $\Delta U_{хя}(I_я)$. Как следует из рис. 5, данный участок практически совпадает с прямой $\omega_1 = b - kM$.

Анализ полученных результатов показывает, что комбинированная САР обеспечивает погрешность аппроксимации в пределах 5 %, за исключением точки максимального момента (10,8 %), в которой ЭП работает лишь при трогании с места.

Методика синтеза САР тока тягового ЭП на базе БДПТ заключается в следующем:

- 1) по (16) определяем коэффициент усиления РТ $k_{РТ}$;
- 2) по (17) рассчитываем коэффициент обратной связи по току $k_{дт}$;
- 3) по (18) находим значение момента короткого замыкания двигателя в замкнутой системе $M_{кз}$;
- 4) решаем систему уравнений (19)–(21) для значений тока двигателя $I_я = 0 \dots I_{кз}$ и строим зависимость $\Delta U_{хя} = f(I_я)$;
- 5) аппроксимируем кривую $\Delta U_{хя} = f(I_я)$ ломаной $\Delta U'_{хя} = f(I_я)$;
- 6) алгоритм формирования компенсирующего сигнала реализуем на основании выражения

$$U_{зтх} = \frac{\Delta U'_{хя}(I_я)}{\beta_n k_{РТ}}$$

с учетом уравнений (22)–(24).

По предложенной методике синтезирована САР тяговым ЭП на базе БДПТ и осуществлено ее имитационное моделирование. В результате имитационного моделирования получены график переходного процесса скорости $\omega_3 = f(t)$ (рис. 6) и динамическая механическая характеристика $\omega_4 = f(M)$

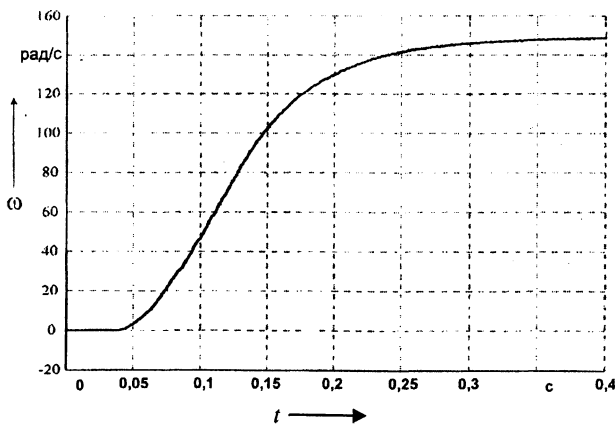


Рис. 6. График переходного процесса $\omega_3 = f(t)$ при линейном задании тока

(рис. 7) при пуске двигателя с номинальной нагрузкой и линейном нарастающем сигнале задания тока. На рис. 7 приведена также статическая механическая характеристика $\omega_3 = f(M)$.

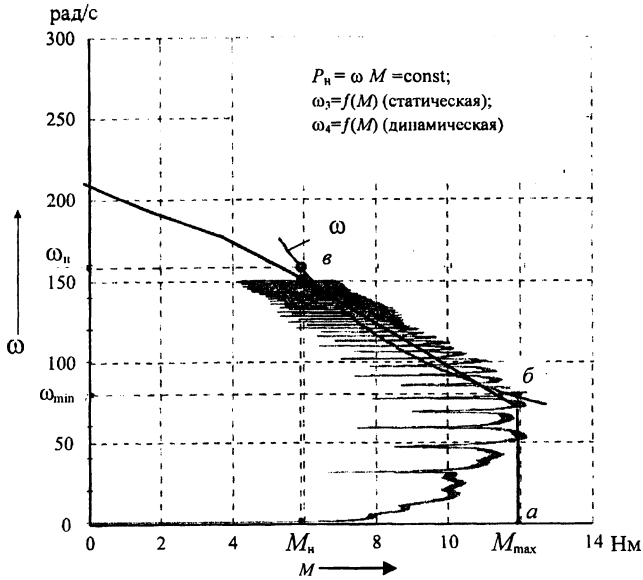


Рис. 7. Статическая и динамическая механические характеристики $\omega_3 = f(M)$ при линейном задании тока

ВЫВОД

Разработана методика синтеза комбинированной САР тока тягового ЭП на базе БДПТ, позволяющая учесть влияние индуктивности статорной обмотки на механическую характеристику БДПТ. САР тока, синтезированная по данной методике, обеспечивает формирование механических характеристик БДПТ, близких к линии постоянной мощности с отклонением, не превышающим 5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и расчет тягового привода электромобилей / И. С. Ефремов, А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин; Под ред. И. С. Ефремова. – М.: Высш. шк., 1984. – 383 с.
2. Лебедев Н. И., Гандшу В. М., Явдошак Я. И. Вентильные электрические машины. – СПб.: Наука, 1996. – 352 с.
3. Михайлов О. П., Цейтлин Л. Н. Измерительные устройства в системах адаптивного управления станками. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

Представлена кафедрой
электропривода и автоматизации
промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 15.10.2001