

УДК 62-83::621.313.2

## УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ И МОМЕНТОМ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРИВОДЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.Д. Громышева, И.Е. Овчинников, А.В. Егоров

Рассматриваются автоколебательные процессы для скорости и тока, возникающие при релейном управлении вентильным двигателем с линейной обратной связью по скорости ротора и току статора. Показана возможность обеспечения плавного регулирования средней скорости и момента при большой жесткости искусственной механической характеристики и ограничении тока в переходных режимах.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, релейный регулятор, привод, скорость, момент.

### Введение

Для управления легким транспортным средством типа заводских электрокаров, электровелосипедов, инвалидных колясок и т.д. наилучшим приводным двигателем является вентильный двигатель (ВД), обладающий механическими и регулировочными характеристиками, близкими к таковым для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, но лишенный скользящих электрических контактов и имеющий более высокий КПД [1].

Для управления двигателем в составе рассматриваемого привода целесообразно использовать наиболее простую, эффективную по быстродействию, простоте реализации и стоимости схему релейного регулятора, включенного в слаботочную цепь датчика положения ротора [2].

### Управление скоростью

Структурная схема рассматриваемого привода показана на рис. 1. На элемент сравнения  $C_{\omega}$  подается сигнал управления  $U_y$ , который определяет заданный уровень установленной скорости  $\Omega_y$ . Этот сиг-

нал сравнивается с сигналом обратной связи тахогенератора ТГ  $k\Omega$ , пропорциональным фактической скорости двигателя  $\Omega$ . Разность сигналов  $\sigma_\omega = U_y - k\Omega$  подается на логическую схему «И».

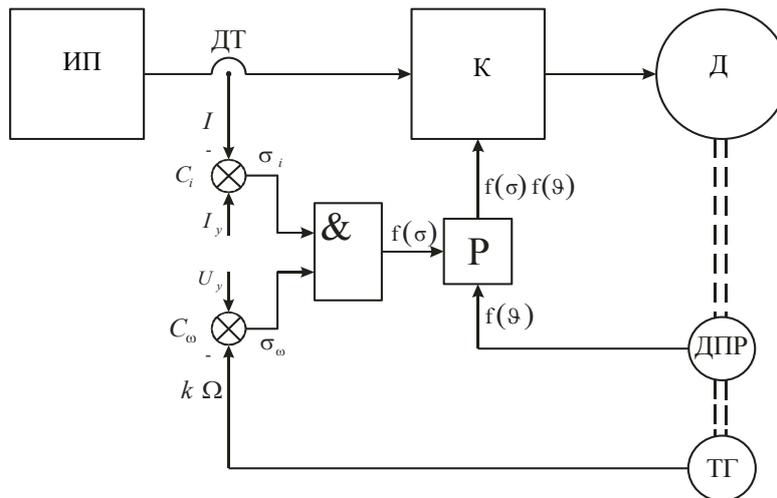


Рис. 1. Структурная схема регулирования скорости: ИП – источник питания; К – полупроводниковый коммутатор; Д – двигатель; ДПР – датчик положения ротора; ТГ – тахогенератор; ДТ – датчик тока; & – логическая система «И»;  $C_i$  – элемент сравнения по току;  $C_\omega$  – элемент сравнения по скорости

На второй элемент сравнения  $C_i$  подается сигнал установки  $I_y$ , определяющий максимально допустимый ток, который может «пропустить» полупроводниковый коммутатор К, питающий двигатель Д. Этот ток сравнивается с фактическим входным током коммутатора  $I$ , и результат в виде сигнала  $\sigma_i = I_y - I$  подается на управляющую схему «И». На выходе схемы «И» вырабатывается единичная функция  $f(\sigma)$ , удовлетворяющая условию:

$$\begin{aligned} f(\sigma) &= 1, \text{ если } \sigma_\omega \cdot \sigma_i \geq 0; \\ f(\sigma) &= 0, \text{ если } \sigma_\omega \cdot \sigma_i \leq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Управляющая функция  $f(\sigma)$  воздействует на бесконтактное реле Р, включенное в слаботочную (10–100 мА) цепь положения ротора ДПР. Если  $f(\sigma) = 1$ , то реле Р включается, и сигнал с ДПР подается на коммутатор К и включает необходимую группу силовых транзисторов, обеспечивающих питание соответствующих фаз двигателя. Если  $f(\sigma) = 0$ , то реле Р отключается, сигнал прерывается, и двигатель отключается от источника.

На рис. 2 при пуске точка А двигается из положения  $A_0$  вдоль линии безразмерного тока  $i_y = \frac{I_y}{I_n}$  до пересечения с естественной механической характеристикой  $\omega = f(\mu)$ . Здесь использованы безразмерные величины – скорость  $\omega = \frac{\Omega}{\Omega_0}$  и момент  $\mu = \frac{M}{M_n}$ , где  $\Omega_0$  и  $M_n$  – скорость идеального холостого хода и пусковой момент соответственно.

После выхода на естественную характеристику в  $A_1$  точка движется по ней в положение  $A_2$ . Это значит, что  $f(\sigma) = 1$ . Из точки  $A_2$  по горизонтальной искусственной характеристике точка переходит в положение  $A_3$ , соответствующее моменту нагрузки на валу  $\mu_n$ , где:

$$\sigma_\omega = U_y - k\Omega \geq 0, f(\sigma) = 1 - \text{двигатель включен, скорость } \Omega \text{ возрастает;}$$

$$\sigma_\omega = U_y - k\Omega \leq 0, f(\sigma) = 0 - \text{двигатель отключен, скорость } \Omega \text{ уменьшается.}$$

Поддержание скорости  $\Omega = \text{const}$  на участке искусственной механической характеристики  $A_2A_3$  осуществляется в импульсном режиме включения – отключения реле Р. В совокупности с логической схемой &, реле (рис. 1) имеет некоторый гистерезис. Петля гистерезиса характеризуется сигналом включения  $\sigma_1 = U_y - k\Omega_1$  и сигналом отключения  $\sigma_2 = U_y - k\Omega_2$ .

В системе устанавливается импульсный режим автоколебаний скорости, тока и момента двигателя, в котором период колебаний  $T$  зависит от внутренних параметров системы, таких, как зона гистерезиса  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ , электромагнитная постоянная обмотки  $T_e$ , механическая постоянная двигателя  $T_m$ , а также от нагрузки  $M_n$ .

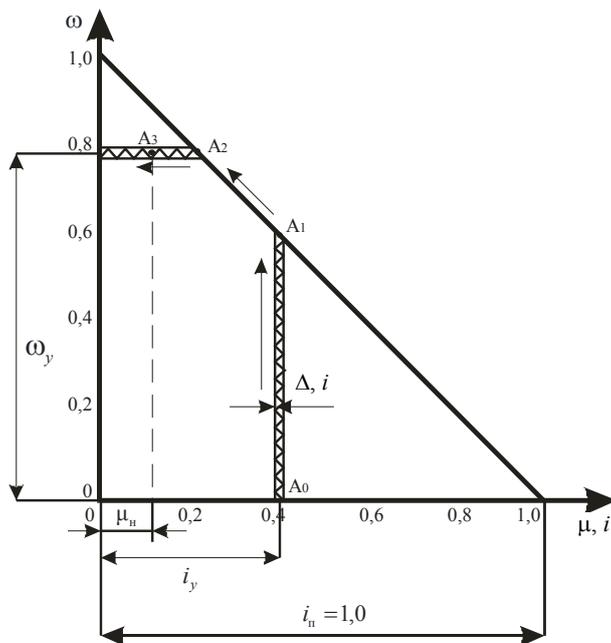


Рис. 2. Механическая характеристика двигателя

На рис. 3 изображен импульсный автоколебательный режим, где импульсная функция  $f(\sigma)$  характеризуется длительностью включения  $t_1$  и периодом  $T$ .

Ток двигателя  $i$  в импульсном режиме колеблется в пределах  $i(0) \leq i \leq i(t_1)$ , где  $i(0)$ ;  $i(t_1)$  – ток в начале и конце импульса соответственно. Предполагается, что внутри периода  $T$ , ток  $i(0)$  не принимает нулевого значения [2]. Нижняя диаграмма рис. 3 показывает изменение безразмерной скорости  $\omega$  в режиме автоколебаний. Верхняя диаграмма показывает гистерезис.

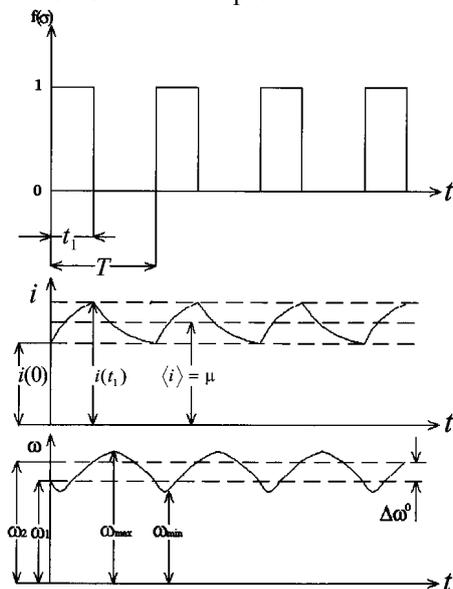


Рис. 3. Импульсный автоколебательный режим

В [3] показано, что для импульсного режима непрерывного тока характерно соотношение:

$$\omega^0 = \tau_1 - \mu_n, \quad (2)$$

где  $\omega^0$  – средняя безразмерная (относительная) скорость двигателя;  $\tau = \frac{t_1}{T}$  – относительная продолжительность включенного состояния;  $\mu_n$  – безразмерный (относительный) момент нагрузки, который далее будет предполагаться независимым от нагрузки.

Условие непрерывного тока в [2] формулируется в следующем виде:

$$\mu_H = \frac{1}{2\varepsilon}(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H), \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \frac{T_e}{T}$  – величина периода автоколебаний;  $T$  – искомая величина.

Запишем уравнения равновесия напряжения на обмотке двигателя и уравнения моментов:

$$T_e \frac{di}{dt} + i = 1 - \omega^0, \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \quad (4)$$

$$T_e \frac{di}{dt} + i = -\omega^0, \quad \text{при } t_1 \leq t \leq T.$$

Уравнение динамики на периоде  $T$  записывается в виде

$$T_m \frac{d\omega}{dt} = i - \mu_H. \quad (5)$$

Решая первое из двух уравнений (4) и подставляя туда время  $t_{\min}$ , соответствующее скорости  $\omega_{\min}$ , имеем условие экстремума для скорости  $\omega_{\min}$ :

$$\frac{d\omega}{dt} = i_1(0) \cdot e^{-\frac{t_{\min}}{T_e}} + (1 - \omega^0) \left(1 - e^{-\frac{t_{\min}}{T_e}}\right) - \mu_H.$$

Отсюда

$$t_{\min} = T_e \ln \frac{1 - \omega^0 - i(0)}{1 - \omega^0 - \mu_H}. \quad (6)$$

Аналогично для условия максимума скорости, решая второе уравнение (4), имеем

$$t_{\max} = t_1 + T_e \ln \frac{\omega^0 + i(t_1)}{\omega^0 + \mu_H}.$$

Из (5) находим минимальное и максимальное значения скорости на периоде  $T$ :

$$\omega_{\min} = \omega_1 - \frac{T_e}{T_m} \left( (\mu_H - i(0)) - (1 - \omega^0 - \mu_H) \ln \frac{1 - i(0) + \omega^0}{1 - \omega^0 - \mu_H} \right);$$

$$\omega_{\max} = \omega_2 + \frac{T_e}{T_m} \left( (i(t_1) - \mu_H) - (\omega^0 + \mu_H) \ln \frac{i(t_1) + \omega^0}{1 + \mu_H} \right).$$

Фактическое среднее значение скорости, определяемое гистерезисным «коридором», равно

$$[\omega] = \omega^0 - \frac{T_e}{T_m} \left( \mu_H - \frac{i(0) + i(t_1)}{2} + \frac{\omega^0 + \mu_H}{2} \ln \frac{i(t_1) + \omega^0}{\omega^0 + \mu_H} - \frac{1 - \omega^0 - \mu_H}{2} \ln \frac{1 - \omega^0 - i(0)}{1 - \omega^0 - \mu_H} \right). \quad (7)$$

Согласно [3], токи в начале и конце импульса будут равны

$$i(0) = \frac{e^{\frac{\tau_1}{\varepsilon}} - 1}{\frac{1}{\varepsilon} - 1}; \quad i(t_1) = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_1}{\varepsilon}}}{1 - e^{-\frac{\tau_1}{\varepsilon}}} - \omega^0. \quad (8)$$

Полагая  $\varepsilon = \frac{T_e}{T} \geq 1$ , что важно с точки зрения режима непрерывных токов (3), можно, разложив в показательные функции в ряд, записать

$$e^{\frac{\tau_1}{\varepsilon}} \approx 1 + \frac{\tau_1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_1}{\varepsilon}\right)^2; \quad e^{-\frac{\tau_1}{\varepsilon}} \approx 1 - \frac{\tau_1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_1}{\varepsilon}\right)^2; \quad e^{-\frac{1}{\varepsilon}} \approx 1 - \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2. \quad (9)$$

С учетом (9) получим выражение для токов (8):

$$i(0) \approx \tau_1 \left( 1 - \frac{1}{2\varepsilon} + \frac{\tau_1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2} \right) - \omega^0; \quad i(t_1) \approx \tau_1 \left( 1 + \frac{1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2} \right) - \omega^0. \quad (10)$$

В результате упрощений (7) приходим к следующему выражению:

$$[\omega] = \omega^0 - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2} \frac{T_e}{T_m} = \omega^0 - \frac{t_1^2}{4T_e T_m}. \quad (11)$$

С ростом момента нагрузки на валу возрастает длительность включенного состояния  $t_1$  и несколько уменьшается средняя скорость  $[\omega]$ .

Далее свяжем нагрузку на валу  $M_H$  с величиной включенного состояния  $t_1$  и периодом автоколебаний  $T$ .

Подставив в правую часть (5) решение для тока из (4) и произведя интегрирование с заменой  $\frac{t_1}{T_e} = \frac{t_1}{T} \frac{T}{T_e} = \frac{\tau_1}{\varepsilon}$ , получим период автоколебаний в системе с релейным регулятором скорости, равный

$$T = \sqrt{\frac{2\Delta\omega^0 T_m T_e}{(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H)}}. \quad (12)$$

Подставим в (12) приращение скорости  $\Delta\omega^0$ , обусловленное наличием зоны гистерезиса реле. Поскольку  $\Delta\sigma = k\Omega_2 - k\Omega_1$ , то разделив обе части равенства на базовую скорость  $\Omega_0$  (скорость идеального холостого хода двигателя), получим  $\Delta\omega^0 = \frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0}$ . Подставив значение  $\Delta\omega^0$  в (12), будем иметь выражения для периода и частоты автоколебаний:

$$T = \sqrt{\frac{2\Delta\sigma T_m T_e}{k\Omega_0(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H)}} \quad (\text{с}), \quad f = \frac{1}{T} \quad (\text{Гц}). \quad (13)$$

Заметим, что

$$t_1 = \tau_1 T = (\omega^0 + \mu_H) T = \sqrt{\frac{2\Delta\sigma T_m T_e (\omega^0 + \mu_H)}{k\Omega_0(1 - \omega^0 - \mu_H)}}. \quad (14)$$

С учетом (14) искусственная механическая характеристика (11) в режиме поддержания средней скорости будет иметь вид

$$[\omega] = \omega^0 - \Delta\omega; \quad \Delta\omega = \frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma(\omega^0 + \mu_H)}{k\Omega_0(1 - \omega^0 - \mu_H)}.$$

Проверим теперь условие непрерывности токов (3) в автоколебательном режиме. Из (3) следует неравенство

$$\varepsilon = \frac{T_e}{T} \geq \frac{(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H)}{2\mu_H},$$

откуда получаем

$$T \leq \frac{2T_e\mu_H}{(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H)}. \quad (15)$$

Подставив в (15) период  $T$  из (13), получаем условие непрерывности тока

$$\frac{\mu_H}{\sqrt{(\omega^0 + \mu_H)(1 - \omega^0 - \mu_H)}} \geq \sqrt{\frac{T_m \Delta\sigma}{2k\Omega_0 T_e}}.$$

Теперь исследуем случай, когда величина периода  $T$  по формуле (13) оказывается настолько большой, а величина  $\varepsilon = \frac{T_e}{T}$  – настолько малой, что разложением  $e^{\frac{1}{\varepsilon}}, e^{-\frac{\tau}{\varepsilon}}$  в степенной ряд с сохранением 2–3 членов (9) пользоваться нельзя:

$$\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega^0 = \frac{T_e}{T_m} (i(0) - 1 + \omega^0) (1 - e^{-\frac{t_1}{T_e}}) + (1 - \omega^0 - \mu_H) \frac{t_1}{T_e}.$$

Подставим сюда  $i(0)$  из (10), введем параметр  $\varepsilon$ , а также заменим  $\Delta\omega = \frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0}$  и  $\frac{t_1}{T} = \tau_1 = \omega^0 + \mu_H$ . В

результате получим уравнение относительно  $\varepsilon$ :

$$\frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0} \frac{T_m}{T_e} = \frac{(1 - e^{-\frac{\tau_1}{\varepsilon}})(1 - e^{-\frac{-(1 - \tau_1)}{\varepsilon}})}{1 - e^{-\frac{1}{\varepsilon}}} + \tau_1(1 - \tau_1).$$

Решив это уравнение, найдем  $\varepsilon$ , а затем и период. Искусственная механическая характеристика может быть построена по уравнению (7) с учетом выражения для токов  $i(0), i(t_1)$  из (8). Таким образом, минимальный момент  $\mu_H^{\min}$  определяется из уравнения

$$\mu_H^{\min} = \frac{B^2}{2} \left( 1 - 2\omega^0 + \sqrt{(1 - \omega^0)^2 + \frac{4}{B^2} \omega^0 (1 - \omega^0)} \right),$$

где  $B^2 = \frac{A^2}{1+A^2}$ ;  $A = \sqrt{\frac{T_m \Delta \sigma}{2k\Omega_0 T_e}}$ . Таким образом, при построении искусственной механической характеристики моменты нагрузки следует выбирать в интервале  $\mu_H^{\min} \leq \mu_H \leq \mu_H^{\max}$ , где  $\mu_H^{\max} \approx 1 - \omega^0$ .

**Управление моментом**

На рис. 4 сигнал управления током (моментом)  $I_y^0$  проходит через блок ограничения сигнала ОС, который предотвращает появление на его выходе сигнала, большего, чем допустимый ток двигателя  $I_{\max}$ . На рисунке ИП – источник питания; К – полупроводниковый коммутатор; Д – двигатель; ДПР – датчик положения ротора; Ф – реле-формирователь; Р – реле  $\varepsilon$ .

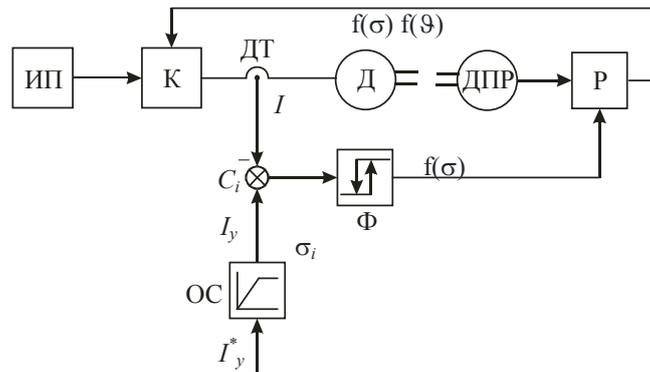


Рис. 4. Схема регулирования момента

Сигнал  $I_y$  сравнивается с фактическим током двигателя  $I$ , и разность сигналов  $\sigma_i = I_y - I$  воздействует на реле-формирователь  $\Phi$ , вырабатывающий управляющую функцию  $f(\sigma) = 1$ , при  $\sigma_i \leq \sigma_1$  и  $f(\sigma) = 0$  при  $\sigma_i > \sigma_1$ . Далее импульсное управление двигателем с помощью реле осуществляется так, как это было описано выше при объяснении принципа работы схемы на рис. 1.

Параметры установившихся автоколебательных режимов поддержания токов двигателя могут быть определены таким же способом, как это было сделано для стабилизации скорости  $\omega$ .

Гистерезис реле приводит к колебаниям тока в границах гистерезисного коридора  $\Delta i = i(t_1) - i(0)$  (рис. 2). Подставляя сюда токи  $i(t_1)$ ,  $i(0)$  из (8), приходим к следующему уравнению:

$$\Delta i = \frac{(1 - e^{-\frac{-\tau_1}{\varepsilon}})(1 - e^{-\frac{-(1-\tau_1)}{\varepsilon}})}{1 - e^{-\frac{-1}{\varepsilon}}}; \tau_1 = \omega^0 + \mu_H = \omega^0 + \bar{k}(\omega^0)^\alpha.$$

**Заключение**

Управление ВД с помощью релейного регулятора при надлежащем выборе параметров является достаточно эффективным средством в решении задачи регулирования и стабилизации скорости, и момента двигателя.

**Литература**

1. Леонтьев А.Г. Вентильные двигатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.unilib.neva.ru/dl/059/CHAPTER5/Chapter5.html> 5.4, своб.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Л.Н. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука, 1979.
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. – СПб: Корона-Век, 2006. – 336 с.

**Громышева Анастасия Дмитриевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [sinderella88@mail.ru](mailto:sinderella88@mail.ru)  
**Овчинников Игорь Евгеньевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, [oveni77@yandex.ru](mailto:oveni77@yandex.ru)  
**Егоров Алексей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [alexeykey@rambler.ru](mailto:alexeykey@rambler.ru)