

РЕЖИМ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОКОВ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗОВЫМ РОТОРОМ

Ю. П. КОСТЮКОВ

Рекомендована научным семинаром электромеханического факультета.

Импульсный метод регулирования скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором в последнее время получает все большее распространение.

Идея импульсного управления скоростью асинхронного двигателя заключается в том, что в роторную цепь постоянного тока (рис. 1) параллельно преобразовательному устройству *П* вводится схема искусственного выключения *ИВ* на тиристорах.

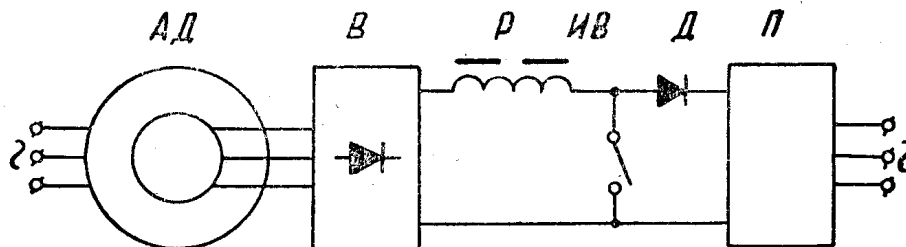


Рис. 1

Такая схема позволяет изменением относительной продолжительности включения силового тиристора регулировать скорость вращения двигателя. Относительная продолжительность включения силового тиристора равна

$$\gamma = \frac{T - t_u}{T}, \quad (1)$$

где  $T$  — период повторения импульсов;

$t_u$  — длительность импульса, соответствующая времени в течение которого преобразователь проводит ток.

Принят закон коммутации с постоянным временем отключенного состояния силового тиристора ( $t_u = \text{const}$ ) и переменной частотой. Выпрямитель *В* собран по трехфазной мостовой схеме; сглаживающий

реактор  $P$  уменьшает пульсации тока. Во избежание короткого замыкания преобразователя в его цепь включен защитный диод  $D$ .

При импульсном регулировании скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором при малых нагрузках в роторной цепи возможен режим прерывистых токов. Представляет интерес найти границу перехода от непрерывного тока к прерывистому. Знание пограничных кривых в приводах с импульсным регулированием облегчает построение механических характеристик в области прерывистых токов [1].

При выводе основных зависимостей приняты следующие допущения: рассматривается установившийся режим при котором активным сопротивлением статора, пульсациями тока с частотой скольжения и углом перекрытия вентилей пренебрегаем; схема искусственного выключения эквивалентна идеальному ключу.

В цепи выпрямленного тока учитывается среднее значение внутренней э.д.с. асинхронного двигателя ( $E_s$ ), активное сопротивление двух фаз обмотки ротора ( $R$ ), индуктивность реактора и индуктивность рассеяния двух фаз асинхронного двигателя ( $L$ ).

Будем считать, что прямое падение напряжения в полупроводниковых вентилях не зависит от величины тока, а падение напряжения на защитном диоде и силовом тиристоре равны и отнесены к общей цепи постоянного тока ( $\Delta U$ ).

В цепи преобразователя учитываем только встречную э.д.с. неизменной величины ( $E_u$ ) и эквивалентное омическое сопротивление ( $R_u$ ).

Схема замещения с учетом указанных соображений представлена на рис. 2. Исходные уравнения, характеризующие работу асинхронного двигателя при произвольном неизменном скольжении  $s$ , имеют вид:

1) для интервала времени, в течение которого силовой тиристор включен,  $0 \leq t \leq \gamma T$

$$i + T_1 \frac{di}{dt} = I', \quad (2)$$

2) для интервала времени, в течение которого ток проходит через преобразователь,  $\gamma T \leq t \leq T$

$$i + T_2 \frac{di}{dt} = I'', \quad (3)$$

где

$$I' = \frac{E_s - \Delta U}{R}, \quad I'' = \frac{E_s - \Delta U - E_u}{R + R_u} \quad \text{— предельное} \quad (4)$$

значение токов соответственно при  $\gamma = 1$  и  $\gamma = 0$ ;

$$T_1 = \frac{L}{R}, \quad T_2 = \frac{L}{R + R_u} \quad (5)$$

— постоянные времени для первого и второго интервалов коммутации. В пограничной точке между непрерывным и прерывистым режимами минимальное значение тока установившегося периодического

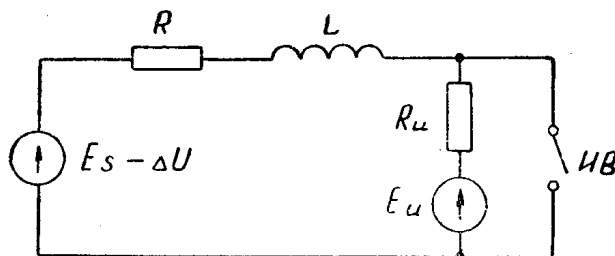


Рис. 2.

процесса обращается в нуль (рис. 3). Введя новую переменную — относительное время [2] и решая уравнение (2) с нулевым начальным условием, находим

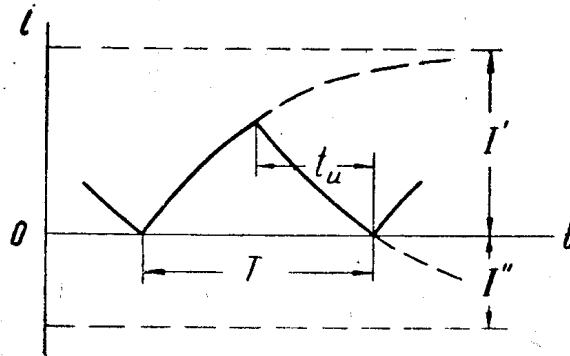


Рис. 3.

$$I' (1 - e^{\alpha\beta\gamma/1-\gamma}) e^{-\alpha} + I'' (1 - e^{-\alpha}) = 0, \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{T_2}{T_1}, \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{t_u}{T_2}. \quad (8)$$

Для среднего значения тока можно получить следующее выражение

$$I_{cp} = I'\gamma + I''(1 - \gamma) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \beta)}{\alpha\beta} (1 - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma}) I'. \quad (9)$$

Зависимость момента асинхронного двигателя от среднего значения тока приближенно определяется формулой [3]

$$M_{cp} = \frac{I_{cp} \cdot E}{\omega_0}, \quad (10)$$

где  $\omega_0$  — синхронная угловая скорость вращения ротора.

Выражение (6) с учетом (4), (5) и (8) можно переписать так:

$$\frac{Es - \Delta U}{E_u} = \frac{1}{1 + \frac{1 - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma}}{(e^\alpha - 1)\beta}}. \quad (11)$$

Очевидно, последнее равенство выполняется только при  $Es - \Delta U < E_u$ . Это и физически понятно, так как только в данном случае ток  $I''$  стремится к отрицательному значению, но вследствие вентильного действия выпрямителей изменение направления тока невозможно и при нулевом значении он прерывается.

Для импульсно-регулируемого сопротивления  $E_u = 0$ , тогда

$$1 + \beta(e^\alpha - 1) - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma} = 0. \quad (12)$$

Это равенство никогда не соблюдается, т. е. при импульсно-регулируемом сопротивлении режим прерывистых токов невозможен. Физически это объясняется тем, что в данном случае предельное значение тока  $I''$  всегда положительно.

Выражение (9) для среднего значения тока с учетом (4), (5) и (8) приводится к виду

$$\frac{I_{cp} \cdot R}{E_u} = \frac{Es - \Delta U}{E_u} \left[ \beta + \gamma(1 - \beta) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \beta)(1 - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma})}{\alpha\beta} \right] - \beta(1 - \gamma). \quad (13)$$

На основании (10), (11) и (13) получим окончательно

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma}}{(e^\alpha - 1)\beta}}; \quad (14)$$

$$M = \varphi \left[ \beta + \gamma(1 - \beta) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \beta)(1 - e^{-\alpha\beta\gamma/(1-\gamma)})}{\alpha\beta} \right] - \beta(1 - \gamma), \quad (15)$$

где  $\varphi = \frac{Es - \Delta U}{E_u}$  — скольжение в относительных единицах, (16)

$M = \frac{M_{ср} R \omega_0}{E E_u}$  — значение момента двигателя в относительных единицах. (17)

Уравнение (14) совместно с уравнением (15) позволяет определить кривые на плоскости  $\varphi, M$ , ограничивающие область непрерывного тока. Пользуясь приведенными выражениями легко построить механические характеристики в области непрерывного (при малых нагрузках) и прерывистого токов.

Например, требуется построить механическую характеристику при относительной продолжительности включения  $\gamma$  и заданных  $\alpha, \beta$ . В режиме непрерывного тока моментно-скоростная характеристика выражается уравнением (15). Для определения точки механической характеристики в области прерывистого тока при произвольной относительной продолжительности включения  $\gamma_n (\gamma_n > \gamma)$  определяем параметр системы  $\alpha_n$  по формуле

$$\alpha_n = \alpha \frac{\gamma(1 - \gamma_n)}{\gamma_n(1 - \gamma)}. \quad (18)$$

В этом случае скольжение  $\varphi_n$  и момент  $M_n$  соответствуют координатам точки граничного режима двигателя, работающего при  $\alpha_n$  и  $\gamma_n$ .

Раскладывая экспоненциальные члены в степенной ряд, получим приближенные уравнения для построения механических характеристик в области прерывистых токов

$$\varphi_n = \varphi \frac{1 - \gamma_n}{1 - \gamma}; \quad (19)$$

$$M_n = (\varphi_n - 1 + \gamma_n) \beta. \quad (20)$$

где  $\varphi$  — скольжение в относительных единицах на пограничной кривой при заданных  $\alpha, \beta, \gamma$ .

При импульсном регулировании скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором значение коэффициента  $\beta$  заключено обычно в пределах 0,5 ÷ 1,0; значение параметра  $\alpha$  всегда можно получить меньше 0,4.

Для облегчения расчетов желательно построить универсальные диаграммы в функции критериев подобия  $\alpha$  и  $\beta$ . На рис. 4 дана диаграмма зависимости  $\varphi$  от  $M$  для различных значений  $\alpha$  при  $\beta=1$ . Эти кривые построены по уравнениям

$$\varphi = \frac{1 - e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha/(1-\gamma)}} \quad (21)$$

$$M = \varphi - 1 + \gamma. \quad (22)$$

Слева от пограничных кривых располагается область прерывистого тока, справа — непрерывного. На рис. 4 также построено семейство механических характеристик при  $\alpha=0,2$ . При  $\beta=1$  характеристики близки к прямолинейным, при  $\beta < 1$  более явно выступает нелинейность механических характеристик. Механические характеристики в области прерывистых токов имеют значительную крутизну (особенно при ма-

ных  $\gamma$ ) и не пригодны для приводов, требующих постоянной скорости при меняющейся нагрузке. Зная пределы изменения момента нагрузки и пользуясь приведенными выражениями, не представляет большого

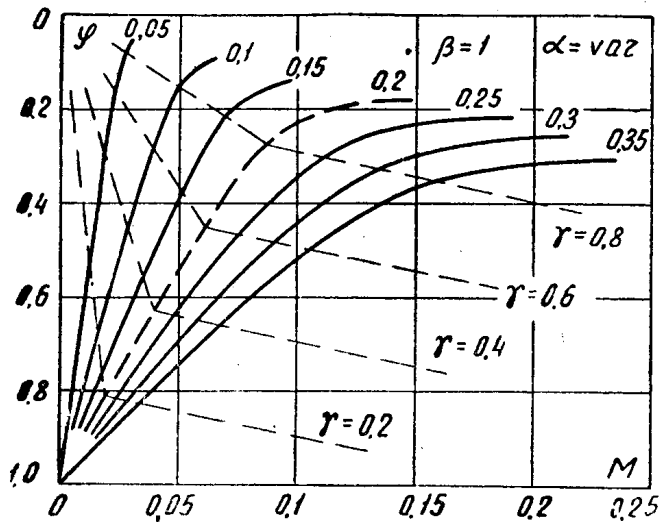


Рис. 4.

труда найти требуемое значение параметра  $\alpha$ , при котором двигатель работает в режиме непрерывного тока. При  $\alpha < 0,05$  режим прерывистых токов практически исключается.

При этом меньшая точность получается при отсутствии сглаживающего реактора, так как заметное влияние оказывают пульсации тока с частотой скольжения.

Экспериментальная проверка расчетных формул проводилась на асинхронном двигателе мощностью 4,0 кВт и преобразовательном устройстве машинного типа. Расхождение экспериментальных и расчетных данных для скольжения и среднего значения тока не превышает  $10 \div 20\%$ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Петров. Расчет переходных процессов электродвигателей постоянного тока с помощью универсальных диаграмм в критериях подобия, Госэнергоиздат, 1963.
2. Я. З. Цыпкиц. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.
3. Ф. И. Бутаев, Е. Л. Эттингер. Вентильный электропривод, Госэнергоиздат, 1951.