

АСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД С ИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А. И. ЗАЙЦЕВ, Ю. П. КОСТЮКОВ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета)

Регулирование скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором осуществляется введением добавочного сопротивления в цепь ротора и по каскадным схемам. Ограниченное применение реостатного управления определяется потерями энергии в роторной цепи и ступенчатостью регулирования, однако этот способ находит применение в приводах с вентиляторной нагрузкой.

Регулирование скорости асинхронных двигателей по каскадным схемам в настоящее время получает все большее распространение. Перспективной является система, в которой энергия скольжения ротора через неуправляемый выпрямитель и вентильный или машинный преобразователь возвращается в сеть.

Последние достижения отечественной промышленности в области тиристоров открывают возможности применения импульсного метода регулирования скорости для асинхронных двигателей.

Принцип построения систем с импульсным регулированием заключается в том, что в роторную цепь постоянного тока (рис. 1) параллельно преобразовательному устройству (П) или добавочному сопротивлению вводится схема искусственного выключения ИВ силового тиристора, состоящая из элементов емкостной коммутации. Такая схема позволяет изменением относительной продолжительности включения силового тиристора регулировать скорость вращения двигателя. Выпрямитель В собран по трехфазной мостовой схеме; сглаживающий реактор Р уменьшает пульсации тока. Во избежание короткого замыкания преобразователя в его цепь включен защитный диод Д.

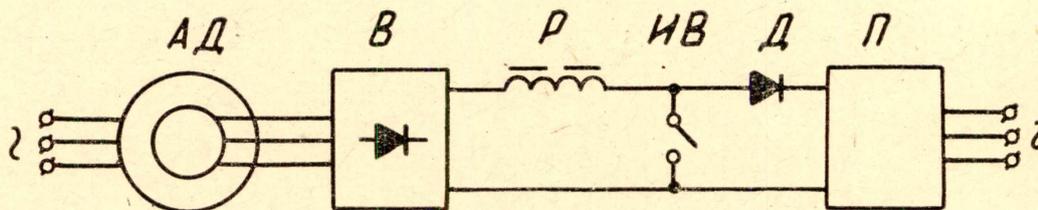


Рис. 1.

Применение импульсного регулирования позволяет снизить габаритную мощность преобразовательных устройств и особенно целесообразно в приводах с вентиляторной нагрузкой, для которых мощность преобразователя при любом диапазоне регулирования будет незначительной. Следует отметить, что преобразователь может использоваться для улучшения общего коэффициента мощности и быть общим для нескольких каскадов.

Для схем с импульсно-регулируемым сопротивлением устраняется основной недостаток реостатного способа — ступенчатость регулирования.

ВЫБОР ЗАКОНА КОММУТАЦИИ. Для импульсного управления электрическими машинами наибольшее распространение получили системы с широтно-импульсной модуляцией и системы с переменной частотой коммутации [1].

Регулирование в подобных схемах осуществляется изменением относительной продолжительности включения, которая равна:

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

где T — период повторения импульсов,

t_u — длительность импульса, соответствующая времени отключенного состояния силового тиристора.

Период повторения ограничивается частотными свойствами и величиной предельной мощности, рассеиваемой тиристором.

При прочих равных условиях потери переключения зависят только от частоты и тока [2].

Для систем с широтно-импульсной модуляцией характерной особенностью является постоянство частоты коммутации силового тиристора. Случай, соответствующий максимальной нагрузке и продолжительности включения, является наиболее тяжелым тепловым режимом для тиристорov с постоянной частотой коммутации.

Применение модуляторов длительности с переменной частотой коммутации существенно облегчает тепловой режим тиристорov и повышает к. п. д. импульсной схемы. Для рассматриваемого закона коммутации характерно $t_u = \text{const}$. Параметром системы в этом случае является величина

$$\alpha = \frac{t_u}{T_2}, \quad (2)$$

где T_2 — постоянная времени в течение второго интервала коммутации.

Величина $\alpha = \frac{t_u}{T_2}$ должна быть выбрана в зависимости от допустимого значения потерь и пульсаций в роторной цепи постоянного тока. В системах с переменной частотой коммутации потери переключения уменьшаются пропорционально росту относительной продолжительности включения. Наиболее тяжелым режимом работы тиристорov при этом законе коммутации является режим, соответствующий максимальной частоте коммутации (то есть минимальной скорости вращения двигателя) и наибольшей нагрузке. При широком диапазоне регулирования скорости вращения асинхронных двигателей с фазовым ротором ток и напряжение в роторной цепи достигают максимальных значений при различных скольжениях, обычно при малых скольжениях напряжение мало, а ток велик, и наоборот; последнее особенно характерно для приводов с вентиляторной нагрузкой. Следовательно, при импульс-

ном регулировании скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором потери переключения не всегда максимальны при наименьшей скорости вращения. В этом случае для получения малых значений γ вполне допустимо завышать рабочую частоту силового тиристора по сравнению с паспортной, так как для уменьшения пульсаций тока желательно выбирать $t_{\text{н}}$ минимально возможным. При этом следует оговориться, что завышение рабочей частоты должно выбираться для каждого конкретного случая в зависимости от характера нагрузки. Исходя из указанных соображений, при импульсном регулировании скорости асинхронных двигателей с фазовым ротором целесообразно применять закон коммутации с постоянным временем отключенного состояния силового тиристора и переменной частотой, как обладающий существенными преимуществами по сравнению с широтно-импульсной модуляцией особенно в приводах с вентиляторной нагрузкой.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА. Ниже дан вывод основных зависимостей, характеризующих работу асинхронного двигателя с фазовым ротором при импульсном регулировании скорости в установившемся режиме.

Очевидно, основные допущения, специфичные для вентиляльных систем [3, 4, 6], будут справедливы и в нашем случае.

При этом считается, что среднее значение внутренней э. д. с. асинхронного двигателя пропорционально только амплитуде линейного напряжения ротора при покое $\left| E = \frac{3}{\pi} E_p \right|$ и скольжению. Снижение

внутренней э. д. с. вследствие перекрытия вентилях приближенно учитывается падением напряжения в эквивалентном омическом сопротивлении, пропорциональном реактанцу рассеяния фазы асинхронного двигателя $\left| R_{\text{эс}} = \frac{3}{\pi} x_{\text{з}} \right|$. Будем считать, что прямое падение напря-

жения в полупроводниковых вентилях не зависит от величины тока, а прямое падение напряжения на защитном диоде и силовом тиристоре равны и отнесены к общей цепи постоянного тока ($\Delta U = \text{const}$). Если пренебречь активным сопротивлением статора, то коэффициенты взаимной индукции между обмотками статора и ротора можно считать неизменными в зависимости от взаимного положения этих обмоток. В этом случае в эквивалентной схеме учитываем постоянной величину индуктивности рассеяния двух фаз асинхронного двигателя.

В цепи выпрямленного тока в любом интервале времени будем учитывать также активное сопротивление двух фаз обмотки ротора (R); индуктивность реактора и индуктивность рассеяния двух фаз асинхронного двигателя (L).

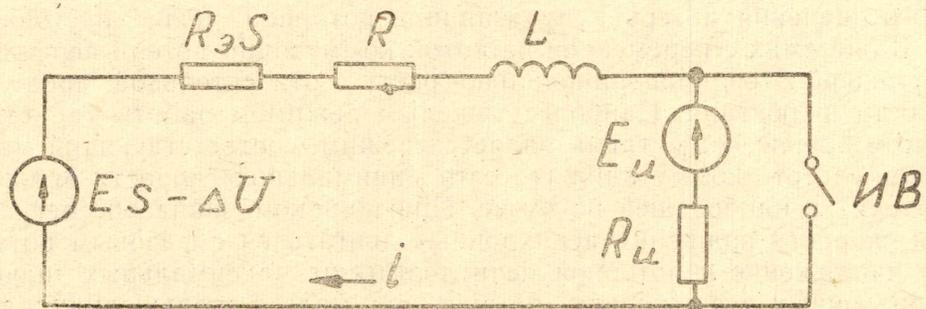


Рис. 2.

В цепи преобразователя учитываем только встречную э. д. с. неизменной величины (E_u) и эквивалентное омическое сопротивление (R_u); этому случаю соответствует большинство описанных в литературе принципиальных схем импульсного регулирования [7].

Вводим следующие ограничения при рассмотрении установившихся процессов: а) пульсации тока с частотой скольжения отсутствуют; б) выпрямленный ток является непрерывным; в) угол перекрытия вентилей не превышает 60° ; г) схема искусственного выключения силового тиристора эквивалентна идеальному выключателю.

При указанных условиях схема замещения представлена на рис. 2. Исходные уравнения, характеризующие работу данной схемы при произвольном скольжении s асинхронного двигателя, имеют вид:

1) интервал времени, в течение которого силовой тиристор включен,

$$0 \leq t \leq \gamma T$$

$$i + T_1 \frac{di}{dt} = I', \quad (3)$$

2) интервал времени, в течение которого силовой тиристор выключен,

$$\gamma T \leq t \leq T$$

$$i + T_2 \frac{di}{dt} = I'', \quad (4)$$

где $I' = \frac{E_s - \Delta U}{R_s s + R}$ — предельное значение тока при данном скольжении и $\gamma = 1$; (5)

$$T_1 = \frac{L}{R_s s + R}$$
 — постоянная времени цепи в течение первого интервала коммутации; (6)

$$I'' = \frac{E_s - \Delta U - E_u}{R_s s + R + R_u}$$
 — предельное значение тока при данном скольжении и $\gamma = 0$; (7)

$$T_2 = \frac{L}{R_s s + R + R_u}$$
 — постоянная времени цепи в течение второго интервала коммутации. (8)

Необходимо помнить, что величина I'' при $E_s - \Delta U < E_u$ отрицательна.

Введя новую переменную — относительное время

$$\bar{t} = \frac{t}{T}, \quad (9)$$

где $T = \frac{t_u}{1 - \gamma}$ — период коммутации,

и обозначив $\beta' = \frac{T}{T_1}$, $\beta'' = \frac{T}{T_2}$, (10)

представим уравнения цепи в виде

$$\frac{di}{\beta' d\bar{t}} + i = I', \quad 0 \leq \bar{t} \leq \gamma, \quad (11)$$

$$\frac{di}{\beta'' d\bar{t}} + i = I'', \quad \gamma \leq \bar{t} \leq 1, \quad (12)$$

Решая эти уравнения обычными методами импульсной техники [5], окончательно получим выражения для размаха пульсаций и среднего значения тока в установившемся режиме.

Размах пульсаций тока в установившемся режиме

$$\Delta I = \frac{(I' - I'')(1 - e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma})(1 - e^{-\alpha})}{1 - e^{-\alpha} \cdot e^{-\alpha\beta\gamma/1-\gamma}}, \quad (13)$$

где
$$\beta = \frac{\beta'}{\beta''} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \beta \leq 1, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{t_u}{T_2}. \quad (15)$$

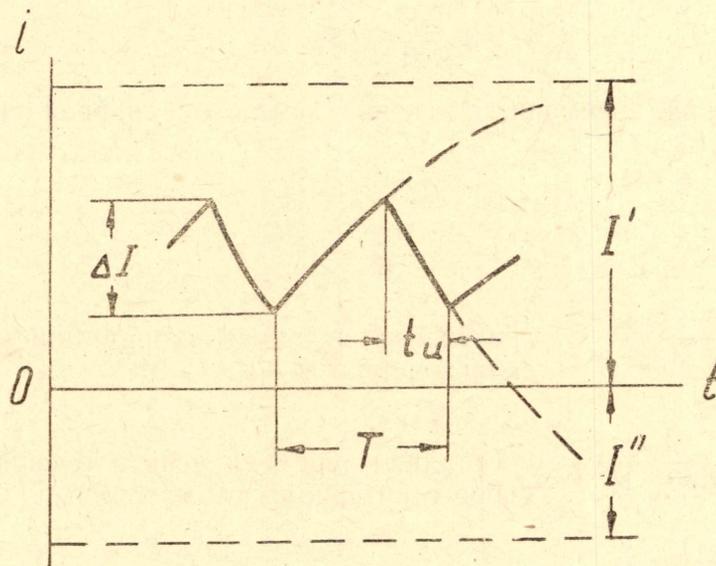


Рис. 3.

Среднее значение тока в установившемся режиме

$$I_{cp} = I'\gamma + I''(1 - \gamma) - \Delta I \frac{(1 - \gamma)(1 - \beta)}{\alpha\beta}. \quad (16)$$

Очевидно, пульсации тока максимальны при наибольшей γ и зависят от α , β . Раскладывая выражение для ΔI в ряд Тэйлора и ограничиваясь первыми двумя членами, что вполне допустимо при малых α , получим для среднего значения тока

$$I_{cp} = \frac{I'\gamma + \frac{I''}{\beta}(1 - \gamma)}{\gamma + \frac{1}{\beta}(1 - \gamma)}. \quad (17)$$

Выражение для размаха пульсаций можно переписать так:

$$\frac{\Delta I}{I_{cp}} = \frac{[(E_s - \Delta U)(1 - \beta) + \beta E_u]\gamma\alpha}{E_s - \Delta U - E_u(1 - \gamma)} \quad (18)$$

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

$$\frac{\Delta I}{I_{cp}} = (1 - \beta) \gamma \alpha. \quad (19)$$

Если заданы допустимые пульсации тока, то, пользуясь приведенными выражениями, находим требуемое значение коэффициента α . По известным α и t_u можно определить постоянную времени в течение второго интервала коммутации и в случае необходимости выбрать требуемую величину индуктивности сглаживающего реактора. При $\alpha < 0,1$ энергетические показатели импульсной схемы практически не отличаются от схем с непрерывным управлением.

СКОРОСТНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Выражение (17) для среднего значения тока можно привести к виду

$$I_{cp} = \frac{E_s - \Delta U - E_u(1 - \gamma)}{R_s s + R + R_u(1 - \gamma)}. \quad (20)$$

Откуда получаем приближенное уравнение скоростной характеристики $n = f(I_{cp})$ для асинхронного двигателя с импульсным регулированием.

$$s = \frac{(E_u + I_{cp} R_u)(1 - \gamma) + \Delta U + I_{cp} R}{E - I_{cp} R_s}, \quad (21)$$

или

$$n = n_0 \left[1 - \frac{(E_u + I_{cp} R_u)(1 - \gamma) + \Delta U + I_{cp} R}{E - I_{cp} R_s} \right], \quad (22)$$

где

n_0 — скорость идеального холостого хода;

n — текущее значение скорости вращения ротора. Отсюда следует, что n пропорционально γ , то есть изменением γ — относительной продолжительности включения, мы соответственно изменяем скорость вращения асинхронного двигателя с фазовым ротором. Работа на большой скорости достигается увеличением относительной продолжительности включения. При $\gamma \rightarrow 1$ скоростная характеристика приближается к естественной. Нижний предел регулирования скорости при $\gamma \rightarrow 0$ определяется внутренней э. д. с. преобразователя; жесткость скоростных характеристик при малых γ ухудшается. При $R_u = 0$ характеристики параллельны друг другу. Для импульсно-регулируемого сопротивления $E_u = 0$ и характеристики имеют вид как при реостатном регулировании. Диапазон регулирования скорости при данных E_u , R_u зависит от изменения γ . Обычно для получения верхнего и нижнего пределов регулирования достаточно иметь γ соответственно 0,95 и 0,05, так как в этом случае характеристики практически совпадают с граничными характеристиками при $\gamma = 1$ и $\gamma = 0$.

Для стабилизации скорости вращения могут быть применены обратные связи.

Зависимость момента асинхронного двигателя от среднего значения тока выпрямленной цепи определяется следующим выражением [4]:

$$M = \frac{1}{\omega_0} E I_{cp} \left(1 - \frac{I_{cp} R_s}{E} \right), \quad (23)$$

где ω_0 — синхронная угловая скорость ротора.

При помощи формул (22) и (23) можно построить скоростные и механические характеристики асинхронного двигателя при неизменной величине γ . При импульсном регулировании скорости асинхронный двигатель может работать в тех же режимах, что и обычный каскад.

Для проверки исходных положений и конечных формул, приведенных в статье, на кафедре электропривода ТПИ было проведено экспериментальное исследование импульсной схемы на асинхронном двигателе мощностью 4,0 квт.

На рис. 4 приведено семейство опытных характеристик $s = f\left(\frac{M}{M_H}\right)$

для асинхронно-вентильного каскада. При малых нагрузках на валу двигателя возможен режим прерывистых токов.

Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает (10+15%), то есть находится в пределах допустимых для инженерной практики.

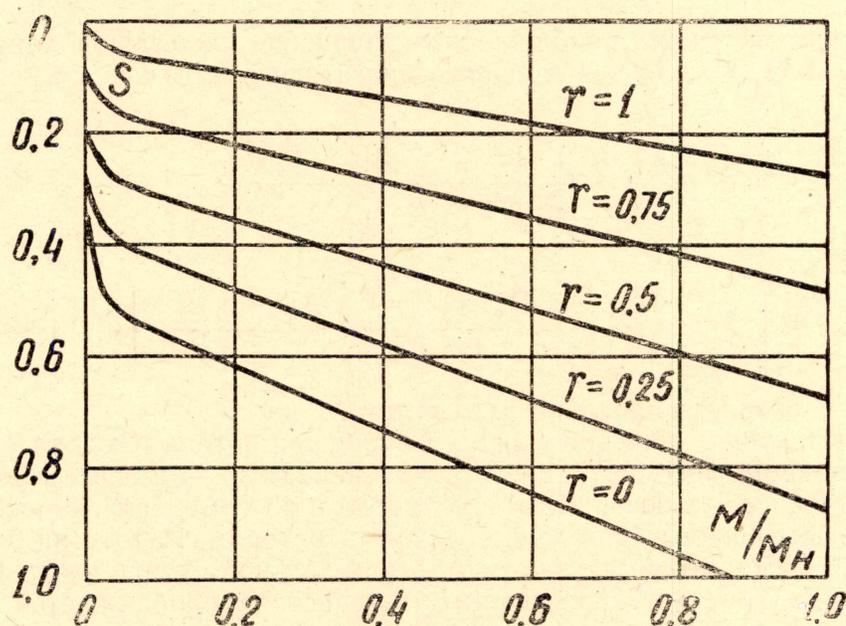


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ф. Березниковский. Автоматическое регулирование и управление электрическими машинами. Судостроение, 1964.
2. Кремниевые управляемые вентили — тиристоры. Технический справочник (пер. с англ.), Энергия, 1964.
3. А. А. Булгаков. Основы динамики управляемых вентильных систем. Изд. АН СССР, 1963.
4. Ф. И. Бутаев и Е. Л. Эттингер. Вентильный электропривод. Госэнергоиздат, 1951.
5. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.
6. Bland R. J., Hancock N. N., Whitenead R. W. Considerations concerning a modified Kramer System. Proc. Instn. Electr. Engrs., 1963, N 12.
7. Abraham Ludwig, Patzschke Ulrich. Pulstechnik für die Drehzahlsteuerung von Asynchron motoren. AEG—mitt, 1964, N 1—2.