

## ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ДОБАВОЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ В РОТОРНОЙ ЦЕПИ

Ю. П. КОСТЮКОВ, О. Г. МАКАРЧЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ ТПИ)

В последние годы в электроприводе получает применение импульсный метод регулирования скольжения асинхронных двигателей с фазовым ротором при повышенной частоте коммутации. Импульсные системы с добавочными сопротивлениями в роторной цепи в отличие от реостатного метода позволяют плавно и бесконтактным способом регулировать скольжение асинхронного двигателя.

На рис. 1 и 2 представлены простейшие принципиальные схемы импульсно-регулируемых сопротивлений в роторной цепи асинхронного двигателя АД. Рассматриваемые схемы импульсного регулирования состоят из неуправляемого выпрямителя  $B$ , собранного по трехфазной мостовой схеме, добавочных сопротивлений, включенных в роторную цепь постоянного или переменного тока, и тиристорного (транзисторного) ключа  $K$ .

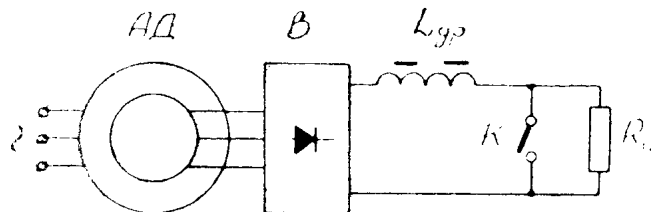


Рис. 1.

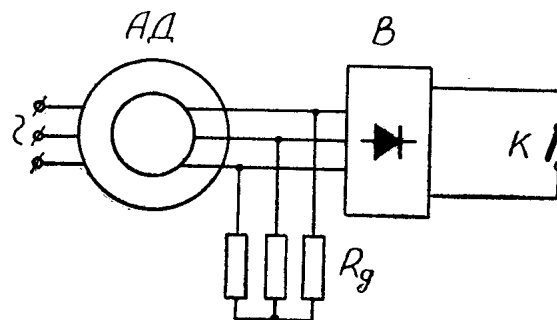


Рис. 2.

Сущность импульсного метода заключается в периодическом изменении электрических параметров вторичной цепи асинхронного двигателя. При включенном ключе  $K$  в индуктивностях двигателя запасается энергия, а во время паузы под действием эдс самоиндукции и эдс

двигателя ток проходит через добавочные сопротивления.

Определение пульсации тока. При импульсном регулировании скольжения асинхронных двигателей в роторной цепи возникают пульсации тока, величина которых зависит от индуктивности промежуточных цепей, частоты коммутации, длительности импульса, диапазона регулирования и схемы силовой цепи.

В системах с импульсно-регулируемым сопротивлением в цепи постоянного тока при общепринятых допущениях проведена замена асинхронного двигателя с выпрямителем, эквивалентным генератору. При переменной частоте коммутации коэффициент пульсаций тока определяется следующим образом:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 - e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}} + \beta e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}} (1 - e^{-\alpha})}{\left(1 - e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}}\right) e^{-\alpha} + \beta (1 - e^{-\alpha})}, \quad (1)$$

где

$I_2, I_1$  — соответственно максимальное и минимальное значения тока установившегося периодического процесса;

$\gamma = \frac{T - t_u}{T}$  — относительная продолжительность включения тиристорного (транзисторного) ключа  $K$ ;  
 $T$  — период коммутации;  
 $t_u$  — длительность импульса, соответствующая времени отключенного состояния ключа  $K$ ;

$\alpha = \frac{t_u}{T_2}, \beta = \frac{T_2}{T_1}$  — параметры системы;

$$T_1 = \frac{1,75L + L_{др}}{R_3 S + 1,75R'}, \quad T_2 = \frac{1,75L + L_{др}}{R_3 S + 1,75R' + R_u}$$

— постоянные времени цепи в течение первого и второго интервалов коммутации;

$L$  — индуктивность рассеяния фазы асинхронного двигателя;

$R_3 = \frac{3}{\pi} (X'_1 + X_2)$  — эквивалентное омическое сопротивление, учитывающее падение напряжения за счет перекрытия вентилей при  $s=1$ ;

$s$  — скольжение асинхронного двигателя;  
 $R' = (R'_1 \cdot s + R_2)$  — активное сопротивление фазы асинхронного двигателя;

$R'_1, R_2, X'_1, X_2$  — соответственно приведенные к цепи ротора активные и индуктивные сопротивления фазы асинхронного двигателя при  $s=1$ , определяемые по уточненной Г-образной схеме замещения при соединении обмоток статора и ротора в звезду;

$L_{др}$  — индуктивность сглаживающего дросселя.

Раскладывая выражение (1) в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, что вполне допустимо при малых  $\gamma$ , получим упрощенное уравнение для коэффициента пульсаций тока:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 - \alpha\beta\gamma}{1 - \alpha\gamma}. \quad (2)$$

В системах импульсного регулирования с добавочными сопротивлениями в цепи переменного тока размах пульсаций меняется и достигает максимума при амплитудном значении первой гармоники фазового тока. В последнем случае коэффициент пульсаций тока определяется по выражению:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 - e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}} + \beta \frac{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_1}{1 + \beta^2 \operatorname{tg}^2\varphi_1} \cdot e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}} (1 - e^{-\alpha})}{\left(1 - e^{-\frac{\alpha\beta\gamma}{1-\gamma}}\right) e^{-\alpha} + \beta \frac{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_1}{1 + \beta^2 \operatorname{tg}^2\varphi_1} (1 - e^{-\alpha})}, \quad (3)$$

где  $I_2, I_1$  — соответственно максимальное и минимальное значения тока при амплитудном значении первой гармоники;

$\operatorname{tg}\varphi_1 = 2\pi f_c \cdot s T_1$  — параметр системы.

При этом постоянные времени в течение первого и второго интервалов коммутации определяются так:

$$T_1 = \frac{L}{R'}, \quad T_2 = \frac{L}{R' + R_g}.$$

В системах с переменной частотой коммутации пульсации тока имеют максимальное значение при наибольшей относительной продолжительности включения и зависят от параметров системы  $\alpha, \beta$  и  $\operatorname{tg}\varphi_1$ . Как видно из выражений (1) и (3), пульсации тока зависят от скольжения асинхронного двигателя, поэтому они определяются в каждом конкретном случае по известным механическим характеристикам и параметрам системы электропривода.

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости коэффициента пульсаций тока от  $\alpha$  при  $\gamma = 0,9$  и разных  $\beta$ , построенные по выражению (1). По этим кривым можно легко определить коэффициент пульсаций тока, зная параметры импульсной системы.

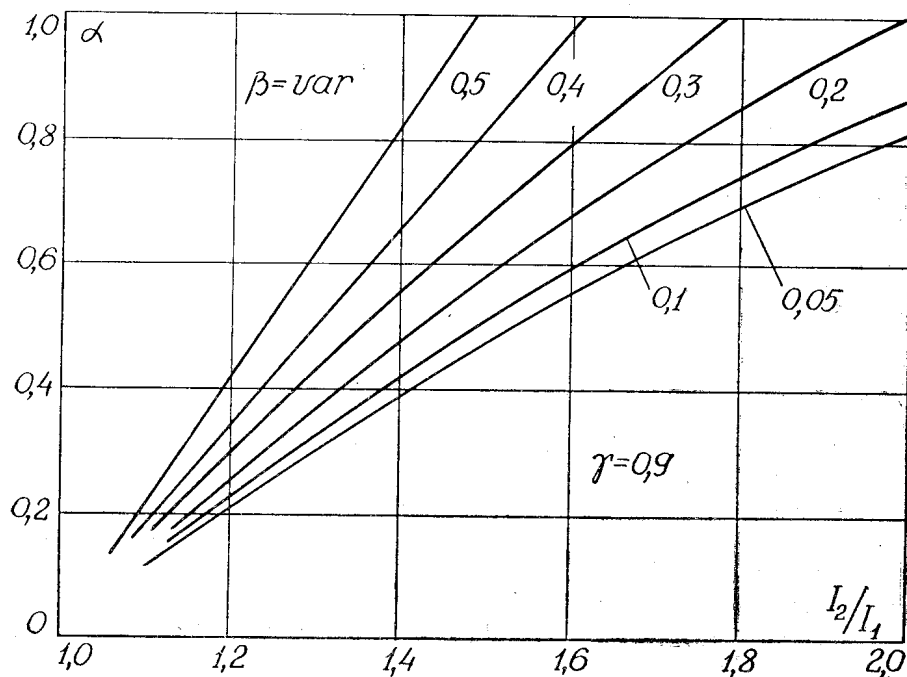


Рис. 3

При заданных допустимых пульсациях тока в зависимости от диапазона регулирования (параметр  $\beta$ ) по приведенным выражениям находим

необходимое значение параметра  $\alpha$ . По известным  $\alpha$  и  $T_2$  определяем требуемую длительность импульса  $t_u$ .

**Механические характеристики.** Регулирование скольжения асинхронного двигателя осуществляется изменением относительной продолжительности включения. Механические характеристики импульсных систем с добавочными сопротивлениями в роторной цепи имеют вид как при реостатном методе.

При импульсном регулировании с добавочными сопротивлениями в роторной цепи постоянного тока искусственные механические характеристики можно рассчитывать обычными методами, которые используются в теории каскадных схем, применяя понятие эквивалентного добавочного сопротивления  $R_u(1-\gamma)$ , вводимого в цепь ротора [1].

В схемах импульсного регулирования с добавочными сопротивлениями в цепи переменного тока неуправляемые вентили работают в импульсном режиме, пауза в кривой фазового тока отсутствует и расчет механических характеристик упрощается. В этом случае при малых пульсациях тока максимальный момент двигателя можно считать неизменным и равным моменту одиночного асинхронного двигателя, а механические характеристики рассчитывать по формуле Клосса. При данных условиях критическое скольжение равно сумме критического скольжения одиночного асинхронного двигателя на его искусственной характеристике и начального скольжения. Критическое скольжение на искусственной характеристике определяется с учетом эквивалентного сопротивления, вводимого в цепь ротора, которое легко находится из энергетического баланса и равно  $R_g(1-\gamma)$ . При  $\gamma=1$  величина начального скольжения соответствует скорости фиктивного идеального холостого хода и определяется падением напряжения на вентилях. Тогда для критического скольжения асинхронного двигателя справедливо выражение:

$$s_k = \frac{R'_2 + R'_g(1-\gamma)}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} + \frac{k_e \gamma \Delta U}{2,34U_1}, \quad (4)$$

где

$U_1$  — действующее значение фазового напряжения питающей сети;

$\Delta U$  — прямое падение напряжения на трех вентилях;

$k_e$  — коэффициент трансформации от статора к ротору;

$X_k = X_1 + X'_2$  — индуктивное сопротивление фазы асинхронного двигателя.

В выражении (4) все параметры приведены к статору асинхронного двигателя.

**Коэффициент мощности и составляющие полной мощности двигателя.** В общем случае коэффициент мощности периодических несинусоидальных токов определяется из равенства:

$$\psi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_p^2 + P_o^2}}, \quad (5)$$

где  $P_a$ ,  $P_p$ ,  $P_o$  — соответственно активная, реактивная и мощность искажения.

Рассмотрим составляющие полной мощности и коэффициент мощности в импульсных системах, когда добавочные сопротивления включены в цепь постоянного тока.

При синусоидальном первичном напряжении в создании активной мощности участвует только активная составляющая первой гармоники тока.

$$P_a = 3U_1 I_c \cos \varphi. \quad (6)$$

Реактивная мощность, потребляемая двигателем, обусловлена реактивной составляющей основной гармоники тока и реактивной мощностью

главного поля. Пренебрегая активной составляющей тока холостого хода асинхронного двигателя, получим

$$P_p = 3U_1(I_c \cdot \sin \varphi + I_o), \quad (7)$$

где

$I_o$  — значение тока холостого хода при скольжении  $s=0$ .

В приведенных выражениях  $I_c$  и  $\cos \varphi$  определяются по формулам [1]:

$$I_c = \frac{4\sqrt{3} I_1 \sin \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{2} \pi \lambda \sigma k_e}, \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{I_c}{U_1} \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \sin \left( \arctg \frac{X_1}{R_1} - \frac{\lambda}{2} \right) + \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

где

$\lambda$  — угол перекрытия вентиляй, определяемый обычным путем;

$\sigma$  — коэффициент рассеяния.

В создании мощности искажения участвуют все высшие гармоники, содержащиеся в первичном токе

$$P_o = 3U_1 \sqrt{\sum_{l \neq 1}^{\infty} (il)^2}. \quad (10)$$

Принимая, что коэффициент искажения вторичного и первичного токов одинаков, получим:

$$P_o = 3U_1 I_c \sqrt{\frac{1}{v^2} - 1}. \quad (11)$$

Коэффициент искажения  $v$  изменяется в небольших пределах и определяется по выражению, приведенному в работе [2]. Коэффициент мощности асинхронного двигателя находится по формуле:

$$\Psi = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\frac{1}{v^2} + \frac{I_o^2}{I_c^2} + \frac{2I_o}{I_c} \sin \varphi}}. \quad (12)$$

В практических расчетах можно принимать  $\varphi \approx \frac{\lambda}{2}$ , тогда

$$\Psi = \frac{c \cos \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\frac{1}{v^2} + \frac{I_o^2}{I_c^2} + \frac{2I_o}{I_c} \sin \frac{\lambda}{2}}}. \quad (13)$$

При импульсном регулировании с добавочными сопротивлениями в цепи постоянного тока коэффициент мощности асинхронного двигателя всегда ниже, чем при обычном включении вследствие перекрытия вентиляй и искажения кривых тока двигателя.

В импульсных системах с добавочными сопротивлениями в цепи переменного тока при высокой частоте коммутации мощностью искажения можно пренебречь. Тогда на основании уточненной Г-образной схемы замещения асинхронной машины активная и реактивная мощности определяются следующим образом:

$$P_a = \frac{3U_1^2 R}{R^2 + X_k^2}, \quad (14)$$

$$P_p = \frac{3U_1^2 X_k}{R^2 + X_k^2} + \frac{3U_1^2}{X_0}, \quad (15)$$

где  $X_0$  — индуктивное сопротивление намагничивающего контура;

$$R = R_1 + \frac{R'_2 + R'_g(1 - \gamma)}{s}.$$

Коэффициент мощности асинхронного двигателя практически будет таким же, как при реостатном регулировании, и определяется по выражению

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \frac{X_k \left( 1 + \frac{X_k}{X_0} \right)}{R} + \frac{R}{X_0} \right]^2}}. \quad (16)$$

В целом по энергетическим показателям рассматриваемые импульсные системы незначительно уступают реостатному методу. При одинаковых условиях в обеих системах импульсного регулирования перегрузочная способность двигателя, коэффициенты искажения и мощности в схемах с добавочными сопротивлениями в цепи переменного тока всегда больше.

К достоинствам импульсного способа регулирования с добавочными сопротивлениями следует отнести: простоту импульсной системы, высокое быстродействие и возможность бесступенчатого пуска, плавное регулирование скольжения, сравнительно высокий к. п. д. при вентиляторной нагрузке и ограниченном диапазоне регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Костюков. Разработка и исследование импульсных систем регулирования скорости вращения асинхронных двигателей с фазовым ротором. Автореферат диссертации. Томск, 1967.
2. Ю. П. Костюков. Некоторые вопросы теории асинхронных двигателей с фазовым ротором при импульсном регулировании скорости. Известия ТПИ, 1967, том 161.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, часть 2, ГЭИ, 1958.
4. А. В. Поссе. Обоснование замены выпрямителя эквивалентным генератором для расчета переходных процессов. Известия АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1965, № 4.