

Способ регулируемого разгона асинхронных приводов и пути его реализации

Буренин В. В., Иванина Е. С., кандидаты техн. наук, Кириллов Н. П.,
Полянский В. И., Катаржин А. В., Сова А. Н., доктора техн. наук

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Рассмотрены возможные способы изменения активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора трехфазных асинхронных двигателей и дана их оценка. Выявлены особенности построения и расчета обмотки ротора, вычислены параметры реальной и эквивалентной цепей обмотки. Определено место включения цепи добавочных резисторов в обмотку ротора, приведены схемы регулируемого кольца и схема шунтирования введенных резисторов. Предложен график разгона двигателя при номинальном пусковом токе.

Ключевые слова: двигатель, короткозамкнутая обмотка, ротор, активное сопротивление, стержень, кольцо.

Асинхронный привод принято считать управляемой электромеханической системой, предназначенной для преобразования электрической энергии в механическую и обратно и управления данным процессом [1]. Простота схем и конструкций трехфазных асинхронных двигателей (ТАД) предопределяет широкое распространение асинхронных приводов, однако оно ограничено (особенно на объектах с маломощными системами электроснабжения [2]) из-за значительного пускового тока ТАД.

Уменьшить его можно путем обеспечения регулируемого разгона, реализуемого разными способами. Основные из них: применение ТАД с фазным ротором, увеличение активных сопротивлений ротора (за счет уменьшения сечения стержней и колец “беличьей клетки”) и вторичной цепи ТАД (вследствие использования материала стержней и колец с большим удельным сопротивлением).

Первый из указанных способов, применяемый при пуске ТАД больших мощностей, позволяет снизить пусковой ток почти в 2 раза. Однако ему свойственны и недостатки, в том числе — обязательное присутствие обслуживающего персонала и более высокая стоимость, чем обычного ТАД [3]. Что касается второго способа, изменять сечения стержней и колец с целью уменьшения пускового момента ТАД возможно только в заводских условиях, а реализация его в эксплуатационных условиях непременно отразится на показателях ТАД после пуска (например, снижается КПД, нарушается тепловой режим [4]), поэтому данный способ применяется редко. Третий способ, при котором медь стержней и колец беличьей клетки заменяют латуной,

также используется ограниченно, поскольку число пусков обычно невелико, а длительность пуска несоизмеримо мала по сравнению с временем непрерывной работы. Применение данного способа возможно, но длительность изменения активного сопротивления вторичной цепи ТАД для регулирования разгона не должна превышать продолжительность пуска двигателя. Для технической реализации такого способа необходимо учитывать особенности построения короткозамкнутой обмотки в виде беличьей клетки, которые в той или иной степени рассмотрены в [3 – 5].

Короткозамкнутая обмотка образуется из z_2 стержней (размещенных в пазах магнитопровода ротора) с токами $I_{c1}, I_{c2}, \dots, I_{ct2}$ и двух колец, с помощью которых образуются электрические соединения между стержнями, причем по участку кольца, расположенному между стержнями 1 и 2, протекает ток I_{k1} , по участку между стержнями 2 и 3 — ток I_{k2} и т. д.

ЭДС и токи, индуцируемые основной гармоникой магнитного поля, в соседних стержнях беличьей клетки сдвинуты на угол

$$\gamma = 2\pi p/z_2, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов.

Звезда векторов ЭДС и токов стержней беличьей клетки в общем случае должна иметь z_2/t лучей (где t — общий наибольший делитель чисел z_2 и p), поэтому конструктивно эта обмотка имеет $m_2 = z_2/t$ фаз с t параллельными стержнями в каждой фазе, однако на практике считается, что каждый

стержень представляет собой отдельную фазу, т. е. $m_2 = z_2$.

Анализ данной схемы показывает, что обмотку ротора ТАД можно рассматривать как многофазную, а именно — как замкнутую накоротко многолучевую звезду. Но участки колец между стержнями имеют определенное сопротивление [3]

$$\dot{z}_k = r_k + jx_k, \quad (2)$$

которое соизмеримо с сопротивлением стержня

$$\dot{z}_{ст} = r_{ст} + jx_{ст}, \quad (3)$$

где r_k , $r_{ст}$ и x_k , $x_{ст}$ — активные и индуктивные сопротивления кольца и стержня.

Указанное свидетельствует о том, что соединение в звезду практически выполняется не накоротко, а через сопротивление z_k .

На практике реальную схему заменяют эквивалентной, которая отличается от рассматриваемой тем, что участки колец не имеют сопротивлений, а сопротивления стержней соответственно увеличены [3].

Таким образом, фаза короткозамкнутой обмотки представляет собой одновитковый контур, состоящий из двух соседних стержней и размещенных между ними участков колец. Число витков w_2 фазы, состоящей из одного контура, равно единице, а обмоточный коэффициент равен коэффициенту укорочения:

$$K_{о2} = K_{y2} = \sin \frac{\pi\varphi}{2\tau} = \sin \frac{\pi p}{z_2}, \quad (4)$$

где $\varphi = 1$ — шаг контура фазы; τ — полюсное деление.

Под током фазы понимается ток контура, равный току на соответствующих участках колец:

$$\dot{I}_{2(1)} = \dot{I}_{к1}; \quad \dot{I}_{2(2)} = \dot{I}_{к2}; \quad \dot{I}_{2(3)} = \dot{I}_{к3}; \dots$$

При этом по каждому из стержней протекают токи двух соседних фаз, т. е. токи стержней равны разности токов соседних фаз (контуров):

$$\dot{I}_{с2} = \dot{I}_{к1} - \dot{I}_{к2}. \quad (5)$$

Если рассматривать треугольник из токов $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{с2}$, можно определить действующее значение тока стержня [6]

$$I_c = 2I_2 \sin \pi p / z_2. \quad (6)$$

ЭДС фазы обмотки ротора $E_{2s} = E_k = E_{к1} = E_{к2} = \dots$ можно рассматривать как разность ЭДС стержней, входящих в контур, например,

$$\dot{E}_{к1} = \dot{E}_{с2} - \dot{E}_{с3}, \quad (7)$$

а действующее значение ЭДС стержня определять из треугольника $\dot{E}_{с1}$, $\dot{E}_{с2}$, $\dot{E}_{к1}$:

$$E_c = E_{2s} / [2 \sin (\pi p / z_2)]. \quad (8)$$

Сопротивления фаз обмотки ротора r_2 , x_2 находят исходя из соображений, что сумма электрических потерь в фазах обмотки $z_2 r_2 I_2^2$ должна быть равна сумме потерь в стержнях и в элементах короткозамыкающих колец между соседними стержнями [5].

После ряда преобразований имеем:

$$r_2 = 2r_{эк} + r_c (I_c / I_2)^2 = 2r_{эк} + r_c \Delta^2, \quad (9)$$

где $I_2 = I_k$ — действующее значение тока фазы; $r_c = \rho l_2 / s_c$ — активное сопротивление стержня; ρ — удельное сопротивление материала; l_2 — длина пакета сердечника; s_c — площадь поперечного сечения стержня; $r_{эк}$ — эквивалентное активное сопротивление кольца; $\Delta = 2 \sin \pi p / z_2$.

По аналогии находим

$$x_2 = 2x_{эк} + x_c (I_c / I_2)^2 = 2x_{эк} + x_c \Delta^2, \quad (10)$$

где $x_{эк}$ — эквивалентное реактивное сопротивление кольца.

Рассмотрим особенности технической реализации выбранного способа управления пусковым током привода, т. е. особенности управления пуском ТАД за счет искусственного изменения активного сопротивления его ротора. Для этого представим короткозамкнутый ротор в виде первой и второй шин переменного тока, имитирующих кольца и n линий, реализующих стержни обмотки ротора. Это позволяет сделать вывод о том, что введение дополнительного активного сопротивления в схему обмотки возможно только путем разреза одного из колец, причем место разреза находится посередине участка кольца, соединяющего соседние стержни. Это позволит не нарушить симметрию обмотки, поскольку механизм преобразования энергии в ТАД при несимметричной обмотке ротора резко искажается [3].

Обмотка является электрической цепью с параллельными ветвями, поэтому помимо технологического расчета, выполняемого при производстве короткозамкнутого ротора, сле-

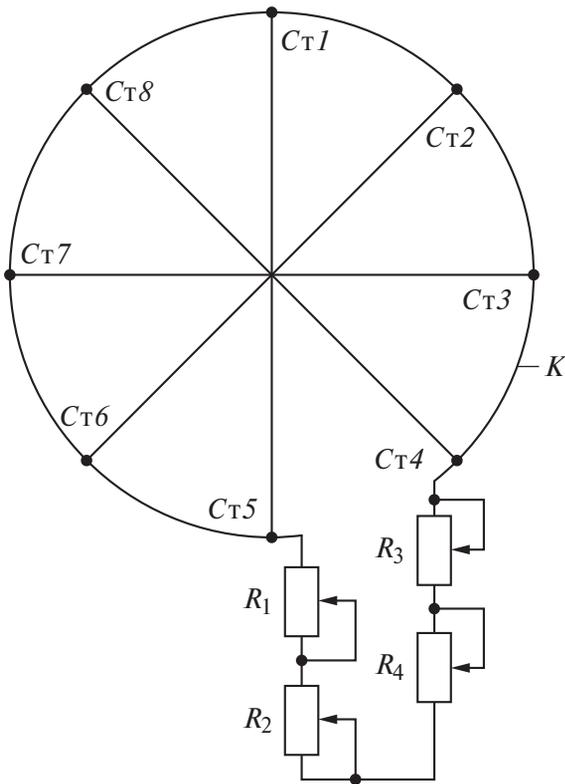


Рис. 1

дует проводить электрический расчет, представляя схему электрической цепью с двумя узлами — *a* и *b*.

При технологическом расчете стержни представляются фазами, и поскольку токи в стержнях и кольцах разные, их приводят к току стержня I_c .

Сопротивление фазы ротора [5]

$$r_2 = r_{ст} + 2r_{кл} / \Delta^2, \quad (11)$$

где $r_{ст} = L_{ст} k_{пр} / (\gamma q_{ст})$; $k_{пр}$ — коэффициент приведения; $r_{кл} = \pi d_{кл} / (\gamma z_2 q_{кл})$; $L_{ст}$ — длина

Параметр	Значение параметра резистора	
	РК223	РК233
Диапазон сопротивлений, Ом	1,0 – 2,4	2,7 – 24
Мощность рассеяния, Вт	1000	1500
Номинальная температура, °С	180	160
Высота, мм	14	20
Диаметр, мм	40	54
Масса, кг	0,08	0,18

стержня; $d_{кл}$ — средний диаметр кольца; $q_{ст}$, $q_{кл}$ — сечения стержня и кольца; γ — удельная электрическая проводимость материала стержня и кольца.

Обычно сопротивление ротора приводят к числу витков обмотки статора, поэтому

$$r'_2 = r_2 k_{пр}. \quad (12)$$

Очевидно, что из всех элементов обмотки ротора (стержней и двух колец) регулирование можно осуществлять только путем изменения сопротивления первой и второй шин переменного тока.

Электрическая схема регулируемого кольца обмотки ротора представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: $C_{т1} - C_{т8}$ — стержни; K — кольцо; $R_1 - R_4$ — введенные в схему резисторы, число которых зависит от вида скоростной характеристики двигателя.

Как правило, на механической характеристике двигателя выделяют два — четыре участка, на которых можно, разделив номиналь-

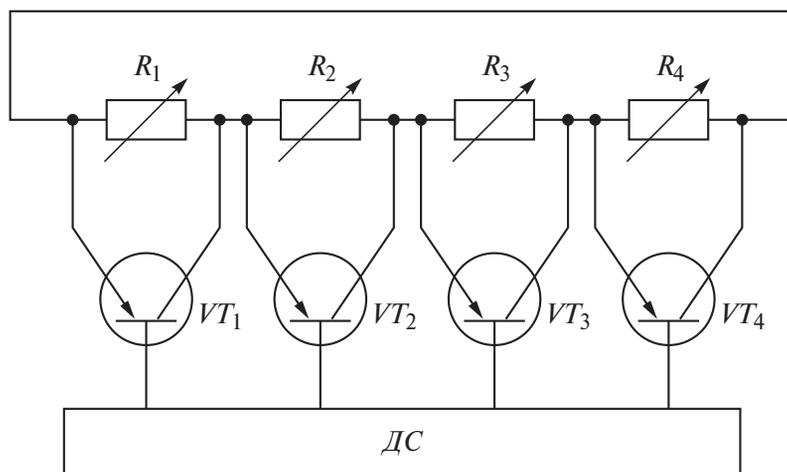


Рис. 2

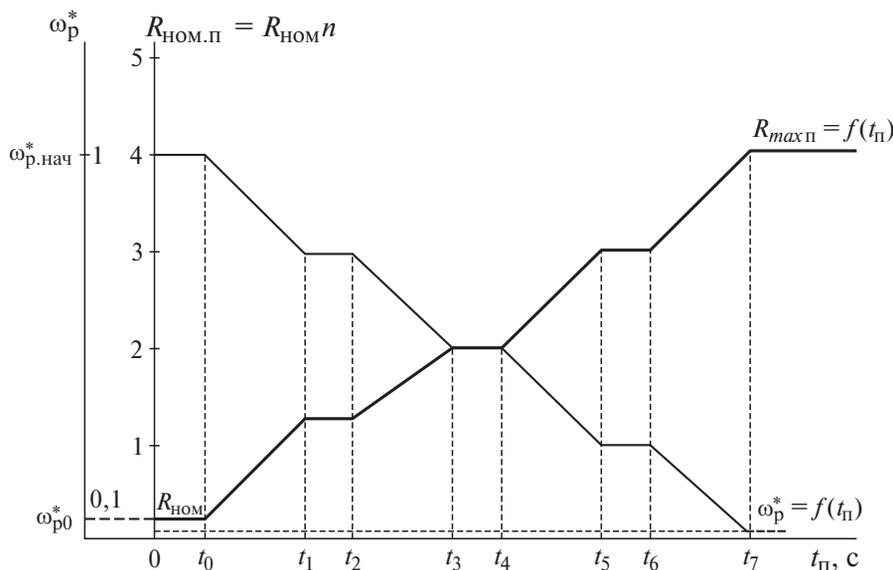


Рис. 3

ную скорость на две — четыре равные части, управлять каждой из них с помощью переменного резистора (причем значения всех резисторов должны быть условно одинаковыми). Параметры некоторых используемых при этом резисторов приведены в таблице.

Схема шунтирования резисторов кольца обмотки ротора ($R_1 - R_4$) показана на рис. 2, где ДС — датчик скорости, а VT1 — VT4 — транзисторные ключи типа ТК1-380-10 или ТК1-380-60. При больших значениях тока коммутируемые ключи могут быть заменены таблеточными тиристорами типа ТБ753Т, рассчитанными на ток до 2500 А при ЭДС, равной 1200 В.

Механизм регулируемого разгона ТАД привода поясняется с помощью графика на рис. 3. Здесь приняты следующие обозначения: $R_{НОМ}$ — номинальное сопротивление обмотки; $R_{НОМ.п}$ и $R_{max п}$ — номинальное и максимальное сопротивления обмотки при пуске; n — кратность тока; ω_p^* — скорость разгона двигателя, отн. ед.; $\omega_{p.нач}^*$ — начальная скорость разгона, отн. ед.; ω_{p0}^* — скорость разгона двигателя при максимальном регулировании, отн. ед.; $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{п}$ — продолжительность пуска, с.

Техническая реализация предложенного способа управления пусковым током двигателя подробно описана в [6]. Приведенные на рис. 3 кривые изменения пускового сопротивления и скорости двигателя имеют многоступенчатый характер (число ступеней равно числу участков рассматриваемых характеристик). Анализ этих кривых свидетельствует о том, что данный способ регулирования пускового тока асинхронных двигателей большой мощности может применяться в различных схемах электроснабжения.

Список литературы

1. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Иванова Е. С. Обоснование и выбор способов управления пуском асинхронного двигателя привода рабочего механизма. — Приводная техника, 2011, № 3.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974.
4. Электротехнический справочник. Т. 4 / Под ред. В. Г. Герасимова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2002.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. — М.: Энергия, 1980.
6. Пат. 2474037 РФ. Ротор асинхронного двигателя с добавочным сопротивлением обмотки // Н. П. Кириллов, Е. С. Иванова. — Оpubл. в бюл., 2013, № 3.

maди.1965@mail.ru