

ББК 261.622.2  
УДК 621.313.33

В.А. Повстень, Д. Аузеллаг

## АСИНХРОННЫЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ ДВИГАТЕЛЬ СО СТЕРЖНЯМИ РОТОРА, РАЗДЕЛЕННЫМИ МАССИВНЫМИ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

*Рассматриваются свойства асинхронного короткозамкнутого двигателя с массивными V-образными ферромагнитными пластинами, которые размещены в пазах ротора примерно на глубине проникновения электромагнитной волны в алюминиевые стержни обмотки ротора при пуске двигателя и делят эти стержни на две части.*

Рассматриваемый асинхронный короткозамкнутый двигатель по своим свойствам занимает промежуточное положение между асинхронными двигателями с массивными ферромагнитными активными частями в роторе [1,2] и двухклеточными и глубокопазными, имеющими улучшенные пусковые свойства. В пазы ротора данного двигателя до заливки алюминием установлены изогнутые массивные ферромагнитные пластины V-образной формы, которые делят литую алюминиевую обмотку (стержни) по высоте на две части. Двигатель изготовлен на базе серийного асинхронного двигателя номинальной мощностью 10 кВт с двадцатью грушевидными пазами в роторе, размеры которых указаны на рис. 1. Площадь пазов  $132,6 \text{ мм}^2$ . На этом же рисунке показано расположение массивных ферромагнитных пластин. Они выполнены с небольшими отгибами в торцевых частях, которыми соприкасаются со стенками пазов и просто фиксируются в них.

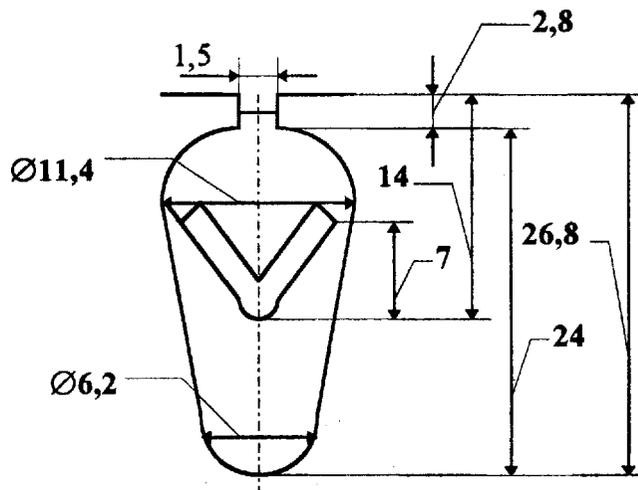


Рис. 1. Паз ротора с изогнутой массивной ферромагнитной пластиной V-образной конфигурации

Как известно, асинхронные двигатели с массивным ферромагнитным ротором и массивными ферромагнитными активными частями в электрической цепи ротора отличаются более высокими пусковыми и регулировочными свойствами, а также более надежны в работе, чем двигатели обычного исполнения. Однако невысокие энергетические показатели (относительно низкие значения КПД и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ ), а также не всегда достаточная перегрузочная способность являются серьезным препятствием для их более широкого применения в различных электроприводах. Поэтому постоянно ведутся поиски

новых технических решений, позволяющих в той или иной мере уменьшить отмеченные недостатки этих двигателей и повысить их удельную мощность. Для этого, в частности, их роторы выполняются зубчатыми, с торцевыми короткозамыкающими кольцами.

В рассматриваемом двигателе для улучшения пусковых свойств без существенного снижения энергетических показателей массивные V-образные ферромагнитные пластины установлены в пазы ротора примерно на глубине проникновения электромагнитной волны в алюминиевые стержни обмотки ротора при частоте 50 Гц, т.е. при пуске двигателя. Пластины занимают лишь относительно небольшую часть площади паза. При этом они оказываются способными выполнять функции узких пазовых щелей, которые делаются в двухклеточных асинхронных двигателях между верхней и нижней клетками ротора для увеличения степени влияния эффекта вытеснения тока на параметры обмотки ротора при пуске.

Действительно, магнитное сопротивление на пути магнитного потока рассеяния, проходящего через установленные ферромагнитные пластины в пазах, определяется в основном лишь суммарным магнитным сопротивлением немагнитных зазоров между пластинами и стенками паза. При этом поток охватывает все участки алюминиевого стержня, расположенные под ферромагнитными пластинами, и почти не сцепляется с его участками, расположенными выше этих пластин. Так же и магнитный поток рассеяния, проходящий через узкие пазовые щели между верхней и нижней частями паза двухклеточного ротора, сцепляется с нижней клеткой ротора и не сцепляется с верхней. Поэтому в исследуемом двигателе части алюминиевых стержней, расположенные над ферромагнитными пластинами, можно рассматривать как стержни верхней клетки двухклеточного ротора (пусковой), а под пластинами – как нижней (рабочей). На торцах ротора они и ферромагнитные пластины закорочены замыкающими алюминиевыми кольцами, которые отливаются вместе со стержнями. Наличие таким образом установленных в пазы ротора массивных ферромагнитных пластин приближает свойства данного двигателя к свойствам двухклеточных и глубокопазных. Следует отметить, что достигается это без необходимости усложнения конфигурации самих пазов. Вместе с этим в зависимости от формы массивных ферромагнитных пластин, их толщины и расположения в пазах (поперек или вдоль), а также от размеров пазов пусковые свойства двигателя в принципе могут приближаться к пусковым свойствам двигателей с вытеснением тока, имеющим различную форму пазов ротора.

Сами по себе достаточно массивные ферромагнитные пластины, помещенные в пазы ротора и закороченные на торцах алюминиевыми замыкающими кольцами, являются одновременно и короткозамкнутой обмоткой ротора, стержни которой выполнены из ферромагнитного материала. Поэтому наличие в пазах ротора ферромагнитных пластин той или иной толщины, закороченных теми же литыми алюминиевыми замыкающими кольцами, в определенной мере приближает свойства двигателя к свойствам двигателей с массивными ферромагнитными активными частями в роторе.

Чтобы при пуске двигателя ферромагнитные пластины не были чрезмерно насыщены, их толщину можно выбирать с учетом следующего соотношения, полученного на основе закона полного тока:

$$d \geq \mu_0 j_2 \frac{S_c^{(1)} b}{k_\mu B_{\max} \Delta} k_i,$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $j_2$  – плотность тока в алюминиевых стержнях ротора в номинальном режиме;  $S_c^{(1)}$  – площадь сечения части алюминиевого стержня под ферромагнитной пластиной;  $b$  – высота пластины в изогнутом состоянии (см. рис. 1);  $k_\mu$  – коэффициент насыщения стали зубцов ротора и пластины;  $B_{\max}$  – допустимое (оптимальное) значение магнитной индукции в ферромагнитной пластине при пуске двигателя;  $\Delta$  – среднее значение суммарного немагнитного зазора между ферромагнитной пластиной и стенками

паза;  $k_i$  – кратность тока в нижней части алюминиевого стержня при пуске двигателя по отношению к его значению в номинальном режиме.

В рассматриваемом двигателе  $b = 7$  мм;  $d = 3$  мм;  $S_c^{(1)} = 81,2$  мм<sup>2</sup> (примерно 60 % общей площади паза).

В общем случае для расчета активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния цепи ротора, в пазах которого помещены закороченные ферромагнитные пластины относительно большой толщины, проще всего воспользоваться электрической схемой замещения стержней ротора лестничной структуры [3], показанной на рис. 2.

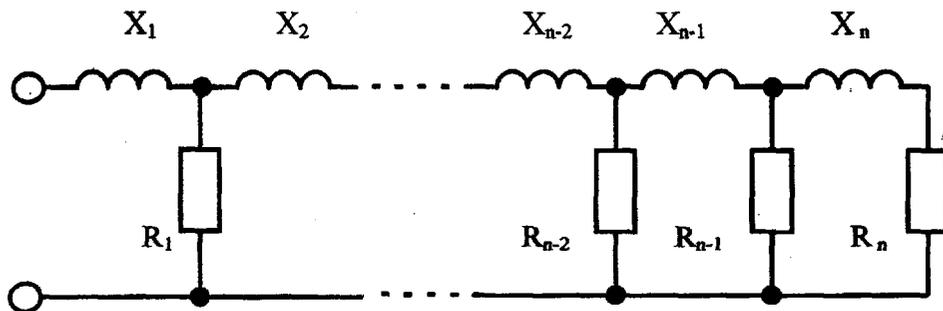


Рис. 2. Электрическая схема замещения пазовой части обмотки короткозамкнутого ротора лестничной структуры

При использовании такой схемы паза короткозамкнутого ротора вместе с обмоткой условно разделяются по высоте на элементарные слои. Магнитное поле в них предполагается плоскопараллельным, а плотность токов в пределах каждого токопроводящего слоя одинаковой.

Электрические параметры элементов схемы замещения  $X_k$  и  $R_k$ , соответствующие отдельным слоям в пазах ротора, определяются формулами:

$$X_k = \omega \mu_0 \frac{h_k l}{\delta_k}; \quad R_k = \rho \frac{l}{h_k \delta_k},$$

где  $\omega$  – угловая частота тока;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;  $h_k$  – высота  $k$ -го слоя;  $l$  – длина пазовой части обмотки ротора;  $\delta_k$  – ширина паза в  $k$ -м слое.

Лестничная электрическая схема позволяет рассматривать закороченные ферромагнитные пластины в пазах ротора как отдельные слои комбинированных стержней, что значительно упрощает расчеты электрических параметров цепи ротора (особенно при сложной конфигурации пазов и пластин). В этом случае для элементарных слоев с ферромагнитной пластиной при определении сопротивлений  $X_k$  в качестве ширины паза  $\delta_k$  должна приниматься не действительная ширина паза на этих участках, а средний суммарный зазор между ферромагнитными пластинами (отогнутыми их частями) и стенками паза, так как абсолютная магнитная проницаемость этих пластин  $\mu_a \gg \mu_0$ , а при определении сопротивлений  $R_k$  – длина пластин в поперечном направлении. В результате комплексное сопротивление пазовой части обмотки ротора  $Z$  и при размещении в пазах ротора ферромагнитных пластин относительно большой толщины может быть представлено в виде дробной функции, у которой числитель и знаменатель являются полиномами величины  $j\omega$ :

$$Z = \frac{\alpha_n (j\omega)^n + \alpha_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + \alpha_1 (j\omega) + 1}{\beta_m (j\omega)^m + \beta_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + \beta_1 (j\omega) + \beta_0},$$

где  $n$  – число одноименных элементов схемы замещения (число слоев, на которые условно разделяются пазы с обмоткой ротора);  $m = n - 1$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  – коэффициенты, процесс вычисления которых, как и при отсутствии в пазах ротора ферромагнитных пластин [4], расчленяется на однообразно повторяющиеся циклы с простейшими арифметическими действиями, что весьма удобно для проведения расчетов на ЭВМ.

Как показали расчеты и экспериментальные исследования, серийный асинхронный двигатель мощностью 10 кВт с показанными на рис. 1 грушевидными пазами, не содержащими ферромагнитных пластин, имеет кратность начального пускового момента, равную 1,64, кратность его начального пускового тока – 6,8; кратность максимального момента – 3, КПД – 86,8 %, а коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,86$ . При наличии в пазах ротора этого двигателя данных V-образных ферромагнитных пластин толщиной 3 мм начальный пусковой момент двигателя возрос до 2,1, кратность начального пускового тока снизилась до 6,1, кратность максимального момента составила 2,8, КПД – 85,6 %, а  $\cos \varphi = 0,85$ .

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной эффективности рассматриваемого исполнения асинхронных короткозамкнутых двигателей для существенного улучшения их пусковых свойств, когда возникает необходимость сохранить другие их характеристики на приемлемом уровне.

#### Список литературы

1. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.
2. Вербовой П.Ф., Заболотный А.П., Съянов А.М. Асинхронные двигатели для тиристорного электропривода. – К.: Наук. думка, 1994. – 244 с.
3. Повстень В.А. Применение теории синтеза электрических цепей для расчета параметров роторных стержней произвольной формы. – Изв. вузов. Электромеханика, 1980. – №10. С. 1022 – 1026.

Стаття надійшла до редакції 7 червня 1998 року.

**Віктор Олександрович Повстень** (1933) закінчив Харківський політехнічний інститут в 1956 році і Московський інженерно-фізичний інститут в 1959 році. Доктор технічних наук, професор, заслужений працівник народної освіти України, завідувач кафедри електромеханіки та світлотехніки Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор 187 друкованих праць в галузі електромеханіки.

**Victor O. Povsten** (b.1933) graduated from Kharkov Polytechnical Institute (1956) and Moscow Engineering and Physics Institute (1959). PhD (Eng), professor, Honoured Worker of public education of Ukraine, Head of chair of Electromechanics and Lighting Equipment of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of 187 publications in electromechanics.

**Аузеллаг Джамаль** народився в 1970 р. в м. Біжая (Алжир), закінчив Ризький інститут цивільної авіації в 1995 році, аспірант кафедри електромеханіки та світлотехніки Київського міжнародного університету цивільної авіації.

**Auzellag Dzhamal** (b.1970 in Algeria, Bajaya) graduated from Riga Institute of Civil Aviation (1995). Aspirant of Electromechanics and Lighting Equipment of Kyiv International University of Civil Aviation.