

УДК 531.3.

**ПОТЕРЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РОТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СТАТОРА**

Шекян Г.Г., Захарянц В.В.

Ключевые слова: устойчивость, ротор, магнитное поле

Key words: stability, rotor, magnetic field

Հ.Գ. Շեկյան, Վ.Վ. Զախարյանց

Ռոտորի կայունության կորուստը մագնիսական դաշտում

Մտնելով, որ ստատորի մագնիսական դաշտում ռոտորի վրա ազդող մագնիսական ուժերը փոխվում են ռոտորի տեղափոխությունների համեմատ, ստացված են նրա ստատիկ կայունության կրիտերիաները, կախված հենարանային պայմաններից և ռոտորի կոշտությունից:

H.G. Shekyan, V.V. Zakharyants

**Loss of the Statical Stability of Electrical Machine Rotor
Under Influence of Stator Magnetic Field**

It is assumed, that magnetic forces, acting on to the rotor by the stator field, are varied proportionally with displacements. The criteria of rotor statical stability, depending on rigid characteristics and boundary conditions are obtained.

Приняв, что магнитные силы, действующие на ротор со стороны поля статора изменяются пропорционально перемещениям, получены критерии статической устойчивости ротора, зависящие от жесткостных характеристик и граничных условий.

В связи с неуклонным ростом скоростей электрических машин, зачастую их выполняют так, чтобы роторы вращались в закритической зоне скоростей. Для этого либо “жесткий” ротор устанавливают на податливых опорах, либо роторы являются “упругими”. Однако, в обоих случаях возникают дополнительные проблемы обеспечения их статической устойчивости [2,5].

В электрических машинах силы магнитного притяжения между статором и ротором меняют свое значение в зависимости от наименьшего расстояния между ними. Поэтому, если упругий или “жесткий” ротор установлен на упругих опорах, то силы одностороннего магнитного притяжения, как и в [1,2,3,4], представляют собой нагрузку, следящую за перемещениями ротора.

Если при определенных условиях суммарная сила одностороннего магнитного притяжения становится больше, чем сила упругости, то ротор теряет устойчивость и перемещение ротора увеличивается до полного прилипания его к статору.

Условие прилипания точечного якоря, подвешенного на консольном стержне и находящегося в стационарном магнитном поле, приведено в [1], где сила магнитного притяжения принята равной $R = 4KY/a^3$, где K – постоянная магнитного поля, Y – перемещение якоря от положения исходного равновесия, a – исходный равномерный зазор между магнитом и якорем.

В электрических машинах согласно [2,3,4] величина одностороннего магнитного притяжения между ротором и статором

$$R_{db} = 7dlB^2Y/a^2 \quad (1)$$

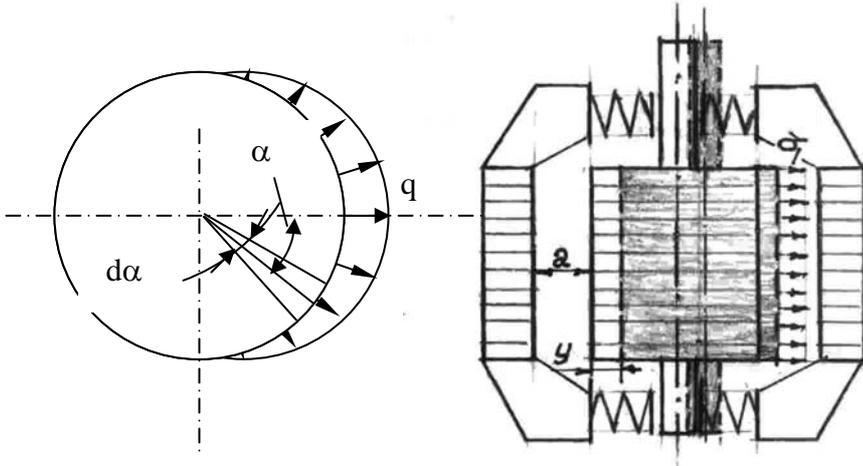
где d – диаметр ротора, l – длина активной части ротора, B – индукция магнитного поля в воздушном зазоре.

В [2,3,4] принято, что силы магнитного притяжения при перемещении ротора от положения исходного равновесия перераспределяются по закону косинуса (фиг.1). Тогда, поскольку сумма всех магнитных сил должна равняться R_{db} , то из фиг. 1. будем иметь:

$$R_{db} = 2 \int_0^{\pi/2} (q_\alpha \cdot ld/2) d\alpha = q \cdot d \cdot l$$

где $q_\alpha = q \cos \alpha$; тогда $q = \frac{R_{db}}{dl}$, т.е. магнитные силы, распределенные по закону косинуса, эквивалентны равномерному распределению по диаметральному сечению с интенсивностью.

С учетом (1) $q = K_1 Y/a^2$, где $K_1 = 7B^2$, т.е. сила одностороннего магнитного притяжения в электрических машинах также пропорциональна смещению ротора, как и в [1,2,3,4,5,6].



Фиг.1. Перераспределение магнитных сил по окружности поперечного сечения ротора.

Фиг.2. Динамическая модель эл.машины с ротором на упругих опорах.

Для определения критерия устойчивости короткозамкнутого ротора электрической машины в магнитном поле возможны два случая:

- жесткий ротор покоится на упругих опорах фиг.2,
- упругий ротор покоится на жестких опорах.

Устойчивость жесткого ротора на упругих опорах рассмотрена в [3].

Здесь же рассмотрим устойчивость симметричного вертикального упругого ротора на жестких опорах (фиг.3).

При отклонении упругого ротора от положения равновесия на величину Y на ротор действует распределенная нагрузка (силы одностороннего магнитного

притяжения) с интенсивностью $q = \frac{K_1 Y}{a^2}$, где $Y = Y(z)$ – прогиб ротора в произвольном сечении.

Дифференциальное уравнение изгиба ротора $EJ \frac{d^4 Y}{dz^4} = K_1 \frac{Y}{a^2}$ можно представить в известном виде:

$$\frac{d^4 Y}{dz^4} - \alpha^4 Y = 0 \quad (2)$$

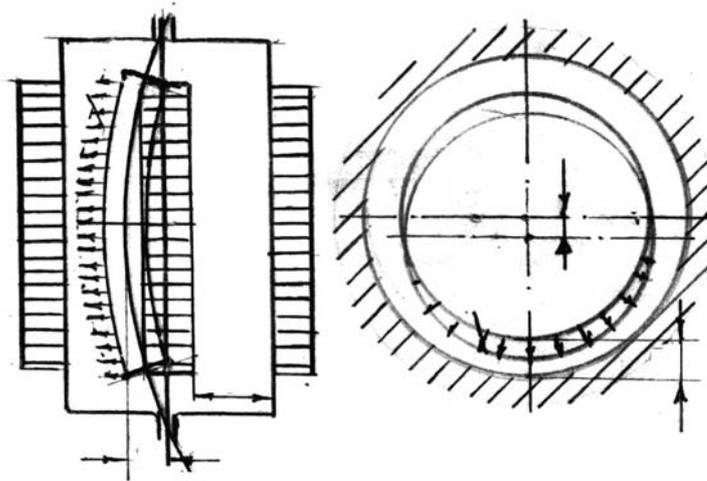
где
$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{K_1}{EIa^2}} \quad (3)$$

Общее решение уравнения (2) имеет вид

$$Y = A_1 \operatorname{sh} \alpha z + A_2 \operatorname{ch} \alpha z + A_3 \sin \alpha z + A_4 \cos \alpha z \quad (4)$$

Это решение должно удовлетворять граничным условиям. В отличие от [1], здесь граничные условия зависят от вида опор:

а) при шарнирном исполнении опор (фиг.3)



Фиг.3. Упругий ротор на шарнирных опорах в симметричном магнитном поле.

$$\begin{aligned} Y &= 0 && \text{при } z = 0 \text{ и } z = l \\ \frac{d^2 Y}{dz^2} &= 0 && \text{при } z = 0 \text{ и } z = l \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда с учетом граничных условий (5) и решения краевой задачи [1] будем иметь:

$$-2 \operatorname{sh} \alpha l \cdot \sin \alpha l = 0, \text{ откуда } \alpha l = \pi, \quad \alpha = \frac{\pi}{l}$$

С учетом (3) получим критическое соотношение параметров, при котором наступает потеря устойчивости.

$$\frac{EJ}{l^4} = 0,049 \frac{K_1}{a^2}$$

Тогда условие устойчивости будет

$$\frac{EJ}{l^4} > \frac{K_1}{a^2} 0,049 \quad (6)$$

б) при роторе на подшипниках скольжения конечной длины опоры не могут поворачиваться, при изгибе ротора граничные условия будут:

$$\begin{aligned} Y = 0 \text{ при } z = 0; & \quad Y = 0 \text{ при } z = l \\ \frac{dY}{dz} = 0 \text{ при } z = 0; & \quad \frac{dY}{dz} = 0 \text{ при } z = l \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом граничных условий (7) и решения идентичной краевой задачи изгиба балок [1] будем иметь:

$$\cos \alpha l \cdot \operatorname{ch} \alpha l = 1 \quad (8)$$

наименьший корень которого равен

$$\alpha l = 4.7300$$

Тогда критическое соотношение между параметрами системы, при котором наступает потеря устойчивости, с учетом (3) будет

$$\frac{EJ}{l^4} > 0.0018 \frac{K_1}{a^2} \quad (9)$$

Во избежание излишних хлопот при проектировании электрических машин с гибкими роторами или с роторами на упругих опорах, необходимо обеспечить условия статической устойчивости по приведенным критериям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем. М.: Наука, 1987. 352с.
2. Шемян Г.Г. Исследование конструкций упругих опор. / Тр. ВНИИКЭ. Т.4. Ереван: 1971. С.194-212.
3. Шемян Г.Г., Захарянц В.В. // В сб.: Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред. 7-ая конференция. Горис. 2005г.
4. Розенберг Е. Одностороннее магнитное притяжение в электрических машинах. М.: Наука, 1967. 357с.
5. Фрейзи У. Односторонние магнитные притяжения в машинах трехфазного тока. TNZ-A 83. 1962. 4. 299-303.
6. Позняк Э.Л. и др. Демпфирование вынужденных колебаний гибких роторов. /Тр. ВНИИЭМ. Т.20. Л.: "Энергия". 1965.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
16.02.2006