

## КОНТРОЛЬ РАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рогозин Г.Г., Дудник М.З.

Изменение величины воздушного зазора ЛАД приводит к ухудшению технико-экономических показателей, а в отдельных случаях к снижению работоспособности или повреждению линейной асинхронной машины.

Для решения проблемы обнаружения неравномерности воздушного зазора установим аналитическую зависимость между диагностическим параметром и геометрическими координатами воздушного зазора ЛАД с использованием индукционного метода. В этом случае сигнал входного воздействия в виде однофазного напряжения прикладывается к двум соединенным последовательно и согласно фазным обмоткам индуктора как показано на рис. 1. Результирующая намагничивающая сила созданная током, протекающим в указанных фазных обмотках наводит ЭДС на зажимах третьей разомкнутой фазной обмотки индуктора.

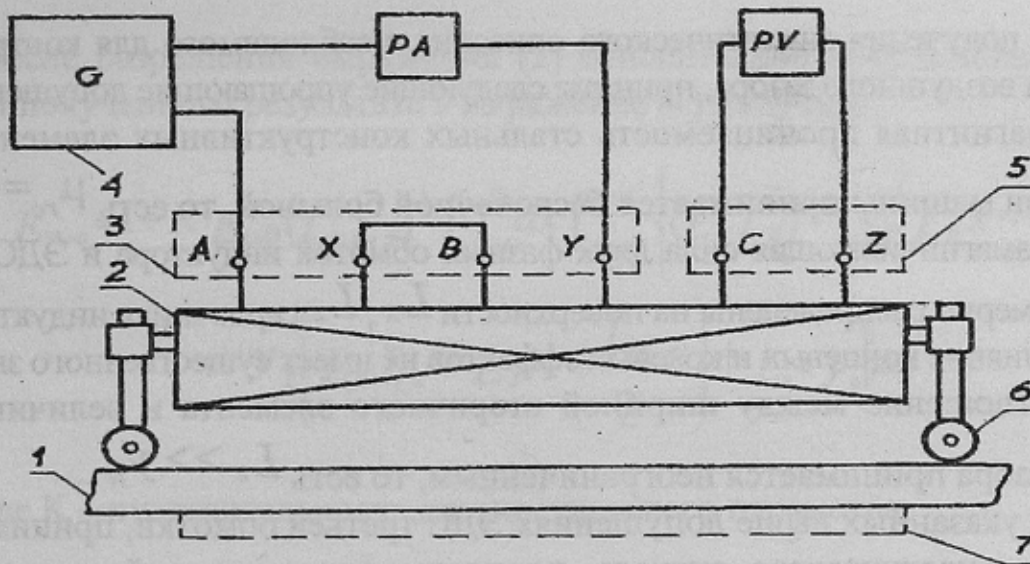


Рисунок 1 – Принципиальная схема контроля равномерности воздушного зазора одноиндукторного ЛАД

1 – вторичной элемент; 2 – индуктор; 3 – фазные обмотки диагностического воздействия; 4 – источник питания; 5 – обмотка измерения диагностического сигнала; 6 – устройство для изменения воздушного зазора; 7 – вспомогательная полоса

Трехмерная система координат воздушного зазора ЛАД, имеющего один индуктор, показана на рис. 2.

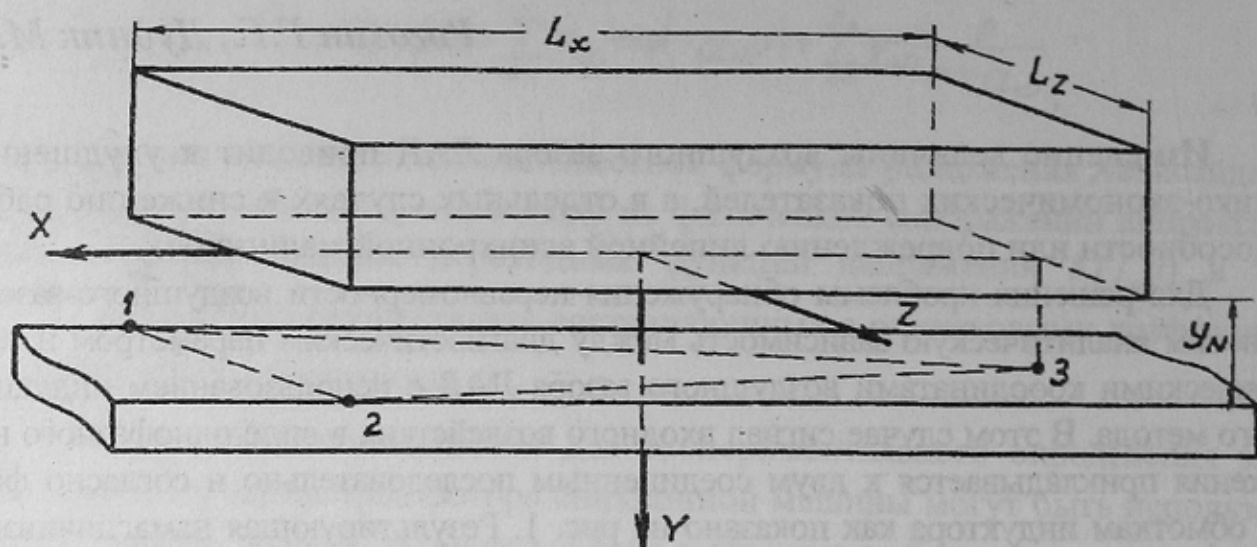


Рисунок 2 – Система геометрических координат ЛАД

Для получения аналитического описания, необходимого для контроля равномерности воздушного зазора, приняты следующие упрощающие допущения:

- магнитная проницаемость стальных конструктивных элементов магнитной цепи машины принимается бесконечной большой, то есть  $\mu_{rc} = \infty$ ;
- намагничивающая сила двух фазных обмоток индуктора и ЭДС третьей фазы равномерно распределены на поверхности  $L_x, L_z$  сердечника индуктора;
- влияние концевых и краевых эффектов не имеет существенного значения;
- отношение между шириной вторичного элемента и величиной воздушного зазора принимается неограниченным, то есть  $L_z \gg y_N$ .

При указанных выше допущениях ЭДС третьей обмотки, принимаемая в качестве диагностического сигнала, пропорциональна полной проводимости воздушного зазора для потокосцепления вдоль оси Y. Учитывая линейный характер зависимости магнитной индукции и ЭДС от проводимости воздушного зазора вдоль оси Y в пределах  $y_N \geq y \geq 0$ , имеем

$$E_{k \neq 0} = (L_x L_z)^{-1} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} dx \int_{-L_z/2}^{L_z/2} \Delta E(k_{x,z}) dz, \quad (1)$$

где  $\Delta E(k_{x,z})$  – ЭДС, наводимая в условном элементе обмотки индуктора, распределенном на элементарной площадке  $\Delta x \times \Delta z$ ;

$k_{x,z}$  – коэффициент, определяющий степень неравномерности воздушного зазора над элементарной поверхностью магнитопровода индуктора с координатами  $x_1, z_1, y_1; x_2, z_2, y_2; x_3, z_3, y_3$ .

В качестве опорных точек на поверхности вторичного элемента, определяющих ее положение относительно индуктора, примем вершины (1, 2, 3) равнобедренного треугольника (см. рис.2) с координатами.  $x_1, z_1, y_1; x_2, z_2, y_2; x_3, z_3, y_3$ .

Используя известную каноническую форму [1] для описания положения поверхности вторичного элемента в принятой системе координат, имеем

$$\begin{vmatrix} x + \frac{L_x}{2} & z - \frac{L_z}{2} & y - y_1 \\ L_x & 0 & y_2 - y_1 \\ \frac{L_x}{2} & -L_z & y_3 - y_1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

После разрешения выражения (2) относительно координаты  $y$  и подстановки полученного результата в выражение (1) получим

$$E_{*k \neq 0} = 1 + K E_{k=0}^{-1} (L_x L_z)^{-1} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} dx \int_{-L_z/2}^{L_z/2} \left\{ (L_x L_z)^{-1} \left[ y_1 \left( L_z x - \frac{L_x}{2} z \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + y_2 \left( L_x L_z - L_z x - \frac{L_x}{2} z \right) + L_x z y_3 \right] \right\} dz, \quad (3)$$

где  $K$  – чувствительность диагностического параметра,

$$K = \left[ E_\sigma(y)_{y_i=0} - E_\sigma(y)_{y_i=y_N} \right] \left( k_{y_i=0} - k_{y_i=y_N} \right)^{-1}, \quad i = 1, 2, 3.$$

ЭДС  $E_{*k \neq 0}$ , рассчитываемая по выражению (3), выражается в долях от ЭДС  $E_{k=0}$ , наведенной на зажимах разомкнутой фазной обмотки индуктора при номинальной величине воздушного зазора ЛАД. Постоянная  $K$  измеряется в единицах напряжения, отнесенных к единицам коэффициента неравномерности.

Интегрируя выражение (3) имеем

$$E_{*k \neq 0} = 1 + K E_{k=0}^{-1} \left[ 1 - 0,25 y_N^{-1} (y_1 + y_2 + 2 y_3) \right]. \quad (4)$$

Для оценки степени неравномерности воздушного зазора ЛАД с помощью количественного показателя, аналогичного используемому для асинхронных машин общего применения [2], целесообразно ввести понятие о коэффициентах неравномерности

$$k_i = (y_N - y_i) y_N^{-1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

которые определяют положение базисных точек вторичного элемента в пространстве.

Учитывая уравнение (5), запишем выражение (4) в следующем окончательном виде

$$E_{k \neq 0} = 1 + 0,25K E_{k \neq 0}^{-1} (k_1 + k_2 + 2k_3). \quad (6)$$

Приведенное выражение позволяет оценивать работоспособность ЛАД, имеющего неравномерность в положении вторичного элемента. Гарантийная характеристика работоспособности может быть получена путем оптимизационного анализа выражения (6).

Имея в виду, что вторичный элемент не может перемещаться по оси Z, критерий такого анализа основывается на нахождении минимального значения диагностического параметра при условиях

$$k_i \leq k_{pv}, k_i \leq k_{iN}, i = 1, 2, 3$$

при всех возможных изменениях положения вторичного элемента по оси Y.

Применяя процедуру минимизации к выражению (6), получим

$$E_{*g} = 1 + 0,5K E_{k=0}^{-1} k_{pv}. \quad (7)$$

При определении базовой характеристики  $E_g$ , необходимой для нахождения постоянной  $K$  следует обеспечивать равенство

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_{pv}.$$

Как следует из выражения (6) в этом случае

$$E_{*g} = 1 + K E_{k=0}^{-1} k_{pv}. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что

$$E_{*g} = E_{rvk \neq 0} E_{k=0}^{-1},$$

и подставляя в уравнение (7)  $k_{pv} = k_{\max}$ , несложно доказать, что

$$y_{\min} = y_N (1 - k_{\max}) = y_N \left[ 1 - 2K^{-1} (E_{rvk \neq 0} - E_{k=0}) \right]. \quad (9)$$

Предложенная методика для контроля равномерности воздушного зазора была реализована для модельного одноиндукторного ЛАД (UN=380 В, IN=8 А), имеющего ферромагнитный вторичный элемент и неподвижный индуктор.

Базовая характеристика, полученная в опыте при выполнении соотношения

$$y_i = idem,$$

где  $0 \leq y_i \leq y_N = 0,01 \text{ м}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , приведена на рис. 3 (см. кривую 1). Ток возбуждения индуктора, обеспечивающий ненасыщенное состояние магнитных цепей ЛАД, был равен 4 А. Как видно из указанного рисунка, базовая характеристика, отражающая изменение диагностического параметра в функции коэффициента неравномерности, имеет линейный характер и может быть описана с использованием следующих, полученных экспериментально, данных

$$E_g(y)_{y=0} = 10,56 \text{ В}, \quad E_g(y)_{y=y_N} = E_{k=0} = 5,43 \text{ В}, \quad K = 5,13 \text{ В к}^{-1}.$$

Гарантийная характеристика работоспособности, рассчитанная с помощью выражения (7), показана на рис. 3 кривой 2.

Для оценки эффективности предложенного метода исходное рабочее положение вторичного элемента было изменено в значительной степени: воздушный зазор был уменьшен с 0,01 м до 0,006 м, вторичный элемент был повернут вокруг оси X, затем воздушный зазор под одним из краев вторичного элемента был зафиксирован на уровне равном 0,009 м, а под другим — 0,003 м.

ЭДС  $E_{rv}$ , измеренная на зажимах разомкнутой фазной обмотки индуктора составила 7,5 В. Методика контроля равномерности воздушного зазора модельного ЛАД иллюстрируется на рис. 3 (см. пунктирные линии). Используя гарантийную характеристику работоспособности для измеренного напряжения мы получим, что минимальный зазор  $y_{\min}$  составляет 0,002 м.

Как следует из рассмотренного примера расхождение, полученное при применении гарантийной характеристики по сравнению с действительной величиной, равной 0,003 м, может быть интерпретировано как запас надежности.

Используя базовую характеристику можно получить среднее значение воздушного зазора  $Y_{av}$ , то есть 0,006 м. Погрешность в этом случае, имеющая обратный знак, что не приемлемо, составит 0,003 м.

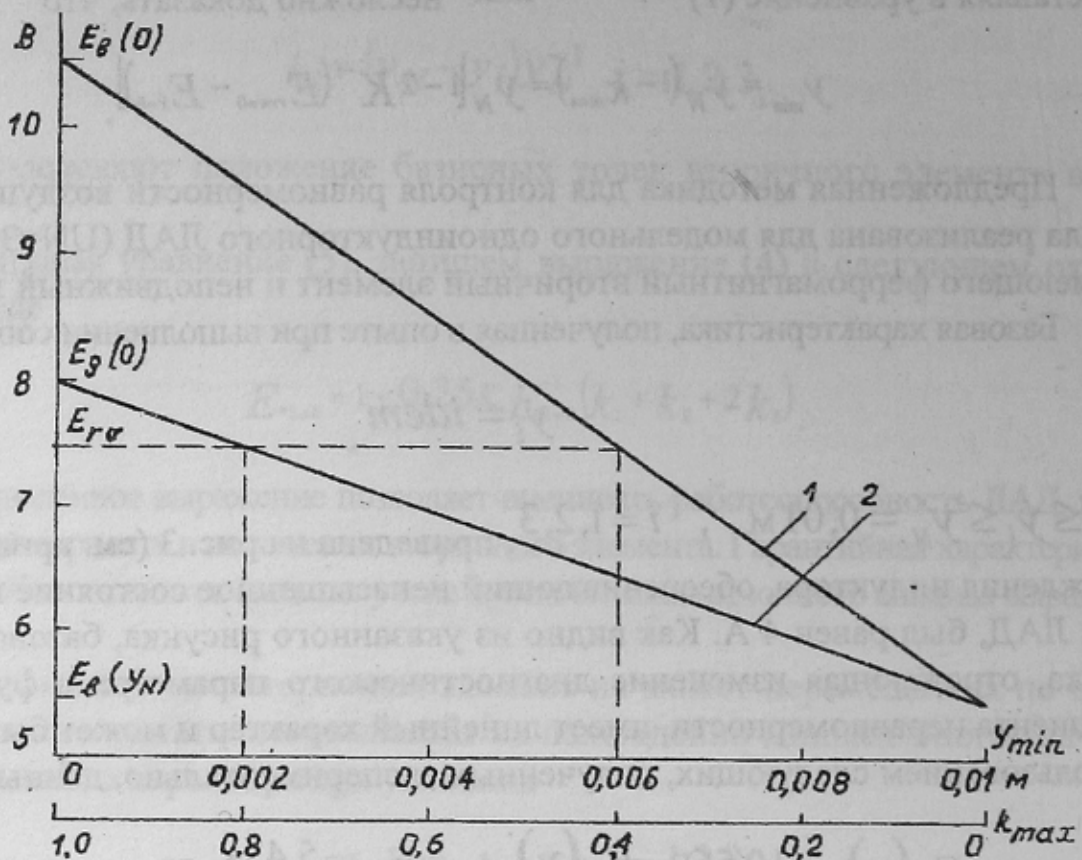


Рисунок 3 – Влияние коэффициента несимметрии воздушного зазора ЛАД на изменение диагностического параметра

1 – базовая характеристика, 2 – характеристика работоспособности

Как видно из рис. 3 область вероятных значений минимального воздушного зазора находится в пределах  $0,006 \text{ м} \geq Y_{min} \geq 0,002 \text{ м}$ .

Приведенные результаты, полученные графическим путем как показано на рис. 3, могут быть также рассчитаны аналитически с помощью выражения 9.

При определении минимальной величины воздушного зазора с помощью характеристики работоспособности погрешность уменьшается при увеличении различия между координатами  $Y_i$  базовых точек вторичного элемента. В случае, когда точки 1, 2 и точка 3 вторичного элемента имеют координаты по оси  $Y$  соответственно равными  $Y_{min}$  и  $Y_N$  может быть получен точный результат. То же самое имеет место, когда  $Y_3 = Y_{min}$ , а  $Y_1 = Y_2 = Y_N$ .

Реализация индукционного метода в случае контроля равномерности одностороннего линейного индукционного двигателя с неферромагнитным вторичным элементом возможна при наложении вспомогательной ферромагнитной полосы 7 на вторичный элемент I в пределах главного магнитного потока индуктора 2 ЛАД (см. рис. 1).

Измерение ЭДС на зажимах разомкнутой фазы индуктора производится каждый раз после перемещения подвижного элемента в направлении движения на величину, равную длине сердечника индуктора.

Если ферромагнитная полоса располагается с обратной стороны по отношению к индуктору, то толщина вторичной полосы должна быть меньше глубины проникновения поля в массивное полупространство. Как известно, при снижении частоты питающего напряжения глубина проникновения увеличивается.

Снижение частоты дает также возможность ослабить демпфирующее влияние вторичного тока, который создает пульсирующий размагничивающий поток. Как показано в [3], коэффициент реакции вторичных токов может быть определен по формуле

$$k_r = \sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 \psi) [1 + (\varepsilon + \operatorname{tg} \psi)^2]^{-1}}, \quad (10)$$

где  $\psi$  – угол сдвига фаз между ЭДС взаимной индукции и вторичным током;

$\varepsilon$  – коэффициент добротности ЛАД,

$$\varepsilon = \mu_0 \omega \tau^2 (\pi^2 \delta \rho_s)^{-1};$$

$\rho_s$  – удельное поверхностное сопротивление вторичного элемента;  
 $\omega = 2\pi f$ .

Таким образом, принимая во внимание реакцию вторичного тока, имеем

$$B_s = B_0 k_r,$$

где  $B_0$  – индукция в случае, когда вторичный ток равен нулю.

Из изложенного следует, что благодаря снижению частоты пульсирующего потока в 10 раз, мы можем существенно ослабить влияние вторичного тока.

Чтобы оценить влияние упомянутого эффекта, рассмотрим относительное изменение коэффициента  $k_r$  при низкой частоте и неподвижном ЛАД ( $S=1$ ). Полагая, что  $f = 0.1$ ,  $\varepsilon = 10$  и  $\psi = 0$ , искомое отношение можно записать, используя выражение (10), следующим образом

$$k_{\cdot} = \sqrt{(1 + \varepsilon^2) [1 + (0,1\varepsilon)^2]} = 7,1 \quad (11)$$

В случае, когда ЛАД рассчитан на частоту выше, чем 50 Гц, для контроля равномерности воздушного зазора предпочтительно использовать промышленную частоту.

Сокращение длительности периодического контроля воздушного зазора может быть достигнуто путем непрерывного перемещения вторичного элемента относительно индуктора за счет внешних сил. Две фазы обмотки индуктора, соединенные как показано на рис. 1, в этом случае питаются от источника, обеспечивающего постоянство величины тока.

Для того, чтобы получить опытные данные, необходимые для определения координаты участка, имеющего дефект, проводят непрерывное одновременное измерение ЭДС на зажимах разомкнутой фазы обмотки индуктора и скорости перемещения подвижного элемента.

Характер изменения ЭДС на зажимах упомянутой фазы показан на рис. 4. Как следует из рассмотрения графической зависимости  $E_{\pi}(t)$  и диагностических характеристик  $E_{\theta}(y)$ ,  $E_{\theta}(y)$

$$k(t_i) = 2 \left[ E_{\pi}(t_i) - E_{\theta}(y)_{y=y_N} \right] \left[ E_{\theta}(y)_{y=y_0} - E_{\theta}(y)_{y=y_N} \right]^{-1}$$

Если ЛАД имеет короткий индуктор, то на основании (9) для момента времени  $t = t_j$  (см. пунктирную линию на том же рисунке) имеем

$$y_{\min}(t_j) = y_N [1 - k_{\max}(t_j)] \quad (12)$$

В общем случае при наличии кривой записи скорости координата минимального воздушного зазора может быть определена из выражения

$$l_j = l_0 + \int_0^{t_j} v(t_j) dt \quad (13)$$

Как показывает анализ, проведенный путем использования частотных характеристик ЛАД, реакция вторичных вихревых токов при частоте  $(1-S)f$  практически не зависит от скольжения в пределах  $\pm 0,1f$ .

Можно показать, что при частоте питающего тока, равной  $0,1f$  и скорости двигателя, равной  $0,9f$ , частота вторичных вихревых токов, обусловленных полями прямой и обратной последовательностей намагничивающего пульсирующего потока будет равна частотам  $0,8f$  и  $1,0f$  соответственно.



Принимая во внимание, что при этом  $\varepsilon_{fc} = 1$ , в соответствии с выражением (11) для отношения коэффициентов реакции вторичных токов имеем

$$k_r = \sqrt{(1 + \varepsilon_{fc}^2)(1 + \varepsilon_{0,8fc}^2)^{-1}} \approx 1,1$$

где  $\varepsilon_{0,8fc} = 0,8\varepsilon_{fc}$ .

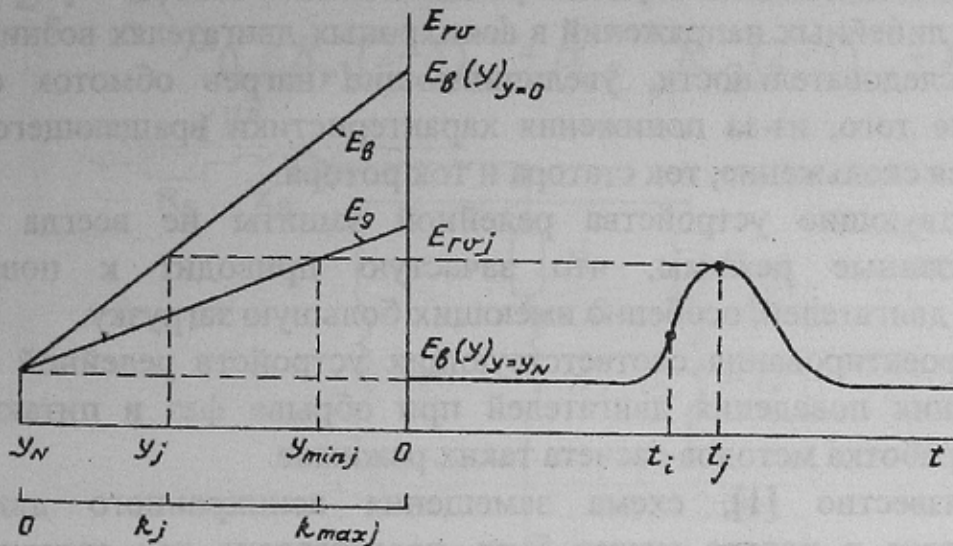


Рисунок 4 — Определение минимальной величины воздушного зазора ЛАД по кривой изменения диагностического сигнала

Следовательно, при приведенных выше условиях поток индуктора в зазоре ЛАД и ЭДС разомкнутой фазы находятся вблизи тех их значений, которые имеют место при определении базовых характеристик.

Предложенная математическая модель измерения неравномерности воздушного зазора ЛАД может быть положена в основу разработки технических приемов и устройств, позволяющих повысить надежность эксплуатации машин различных конструктивных исполнений.

### Список литературы

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). — М.: Наука, 1973, — 832 с.
2. Рогозин Г.Г., Лапшина Н.С. Контроль равномерности воздушного зазора асинхронной машины по значению синхронного индуктивного сопротивления. — Электричество, 1981, №11. — с. 44-46.
3. Васильев Л.А. Дудник М.З. Особенности расчета линейных асинхронных двигателей для двухкоординатного манипулирования массивными стальными листами. — Электричество, 1986, №8. — с. 60-62.