

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.333

DOI: 10.17816/transsyst20228150-66

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина
Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАТЕЛЬНО- ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обоснование: многообразие современных электроприводов требует создания новых видов электродвигателей с расширенными функциональными возможностями. К таким электрическим машинам относятся и цилиндрические линейные асинхронные двигатели с вращательно-поступательным движением вторичных элементов.

Цель: разработка цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента.

Метод: использование дискретной системы индуктора для реализации вращательно-поступательного движения вторичного элемента, аналитическое решение полевой задачи.

Результат: новая конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента, соотношение для определения осевого усилия двигателя.

Заключение: предложенная конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя обладает расширенными функциональными возможностями за счет одновременной реализации вращательно-поступательного перемещения вторичного элемента.

Ключевые слова: цилиндрический линейный асинхронный двигатель, дискретный индуктор, вторичный элемент, вращающееся магнитное поле, бегущее магнитное поле, токовый контур, осевое усилие.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrical Engineering

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, L.L. Zamshina, N.A. Trubitsina
Rostov State Transport University
(Rostov-on-Don, Russia)

DETERMINATION OF THE AXIAL FORCE OF A CYLINDRICAL LINEAR INDUCTION MOTOR WITH ROTATIONAL- TRANSLATIONAL MOVEMENT OF THE SECONDARY ELEMENT

Background: the variety of modern electric drives requires the creation of new types of electric motors with enhanced functionality. Cylindrical linear induction motors with rotational-translational movement of secondary elements also belong to such electric machines.

Aim: development of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element.

Methods: the use of a discrete inductor system for the implementation of the rotational-translational movement of the secondary element, the analytical solution of the field problem.

Results: new design of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element, the ratio for determining the axial force of the motor.

Conclusion: the proposed design of a cylindrical linear induction motor has extended functionality due to the simultaneous implementation of the rotational-translational movement of the secondary element.

Key words: cylindrical linear induction motor, discrete inductor, secondary element, rotating magnetic field, running magnetic field, current circuit, axial force.

ВВЕДЕНИЕ

Линейные двигатели, перспективны для применения в современном электрическом приводе. Тяговый электропривод для магистрального высокоскоростного магнитолевитационного транспорта содержит линейные электрические машины [1–8]. Ведутся исследования и разработки линейного асинхронного электропривода для городского магнитолевитационного транспорта и метрополитена [9–14]. Электрический привод на базе линейных асинхронных двигателей (ЛАД) применяется в различных машинах и механизмах [15], что позволяет создавать надежные устройства с простыми кинематическими схемами. Значительный вклад в создание и развитие электрических приводов с цилиндрическими линейными асинхронными двигателями (ЦЛАД) внес профессор О.Н. Веселовский [15]. В статье рассматривается ЦЛАД с расширенными функциональными возможностями, который обеспечивает вращательно-поступательное движение вторичного элемента (ВЭ).

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В ряде электроприводов требуется вращательно-поступательное перемещение рабочих органов, которое достигается применением сложных кинематических схем или сочетанием двух электрических машин – вращательной и линейной. Сочетание двух видов движения вращательного и поступательного может быть обеспечено при помощи цилиндрических электромагнитных устройств с трехфазными обмотками. Простейшая

конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента представлена на Рис. 1. Индуктор ЦЛАД состоит из ряда элементарных сердечников 1, расположенных соосно один за другим. Каждый элементарный сердечник 1 содержит трехфазную обмотку 2. Внутри элементарных сердечников расположен цилиндрический вторичный элемент 3 из электропроводящего материала (Рис. 1).

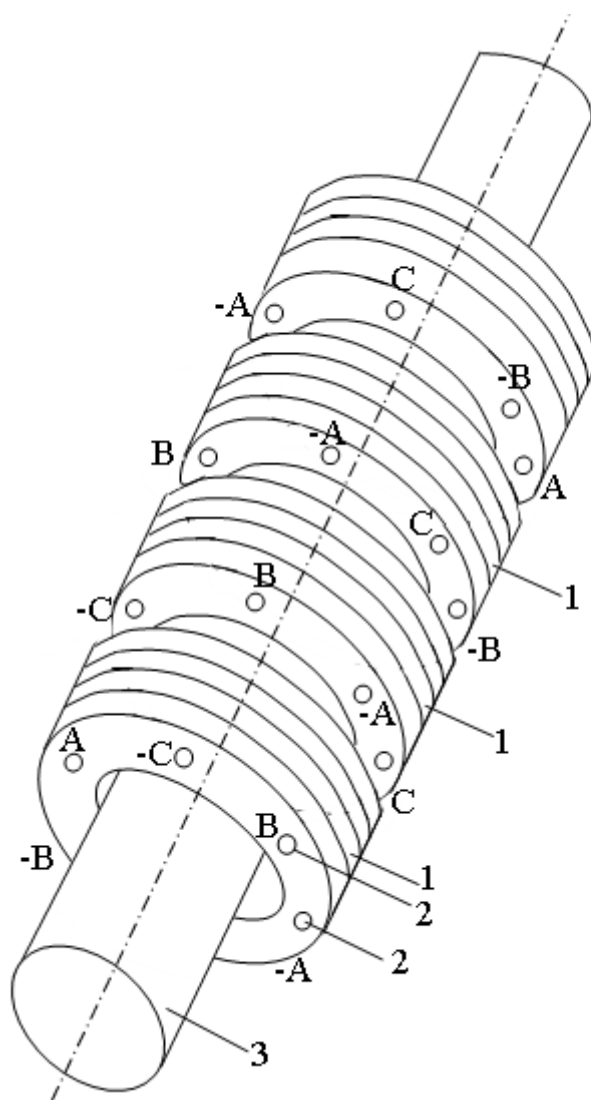


Рис.1. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель с вращательно-поступательным перемещением вторичного элемента. 1 – элементарный сердечник индуктора; 2 – трехфазная обмотка; 3 – вторичный элемент

Каждый последующий элементарный сердечник с трехфазной обмоткой повернут вокруг своей оси по отношению к предыдущему на угол, занимаемый одной катушечной группой фазы обмотки сердечника. В этом случае (Рис. 1) вся система элементарных сердечников индуктора ЦЛАД образует в продольном направлении трехфазные обмотки с

прямыми (или обратными) порядками следования фаз: А, -С, В, -А, С, -В, ... ; -С, В, -А, С, -В, А, ... ; В, -А, С, -В, А, -С, ... ; -А, С, -В, А, -С, В, -А, ... ; и так далее. В свою очередь, во внутренней расточке каждого элементарного сердечника 1 его обмотка 2 будет иметь прямой (или обратный) порядок следования фаз. Принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя следующий. При подключении обмотки индуктора ЦЛАД к источнику напряжения вся система обмоток индуктора возбуждает бегущие в осевом направлении магнитные поля, одновременно обмотки элементарных сердечников создают вращающиеся магнитные поля. Бегущие и вращающиеся магнитные поля пересекают вторичный элемент и наводят в нем электродвижущие силы, вызывающие протекание вихревых токов.

В результате взаимодействия бегущих магнитных полей с токами, ими индуцированными во вторичном элементе, создаются осевые (продольные) механические усилия, приводящие ВЭ в поступательное перемещение. Одновременно в пределах каждого элементарного сердечника с трехфазной обмоткой возникает механический момент, обусловленный действием вращающегося магнитного поля на токи вторичного элемента, им индуцированными. Под действием суммарного механического момента ВЭ начнет вращаться. Осевые (продольные) усилия будут складываться с вращающим моментом и вторичный элемент будет двигаться по винтовой линии, т.е. ВЭ будет осуществлять вращательно-поступательное перемещение. Для увеличения продольных усилий ЦЛАД все элементарные сердечники объединяются общим ярмом, например, размещают их внутри стальной трубы, играющей одновременно роли ярма и корпуса двигателя.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАТЕЛЬНО- ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Рассмотрим ЦЛАД, у которого элементарные сердечники имеют явно выраженные полюсы, на которых расположены катушки сосредоточенной обмотки. Вопросы теории линейных асинхронных двигателей посвящены работы [16-20], в которых рассматриваются различные расчетные модели машин. Для получения расчетной модели двигателя мысленно разрежем все элементарные сердечники по образующим и развернем их на плоскости (Рис. 2). Вторичный элемент 1, имеющий ширину $2s$, также развернут на плоскости. На плоской развертке ЦЛАД (Рис. 2) стрелка 2 показывает направление бегущего, а 3 – вращающегося магнитного поля. На Рис. 2 показана система координат.

Прямоугольные токовые контуры индуктора ЦЛАД соответствуют полюсам с катушками обмотки, по которым протекают синусоидальные токи (Рис. 2).

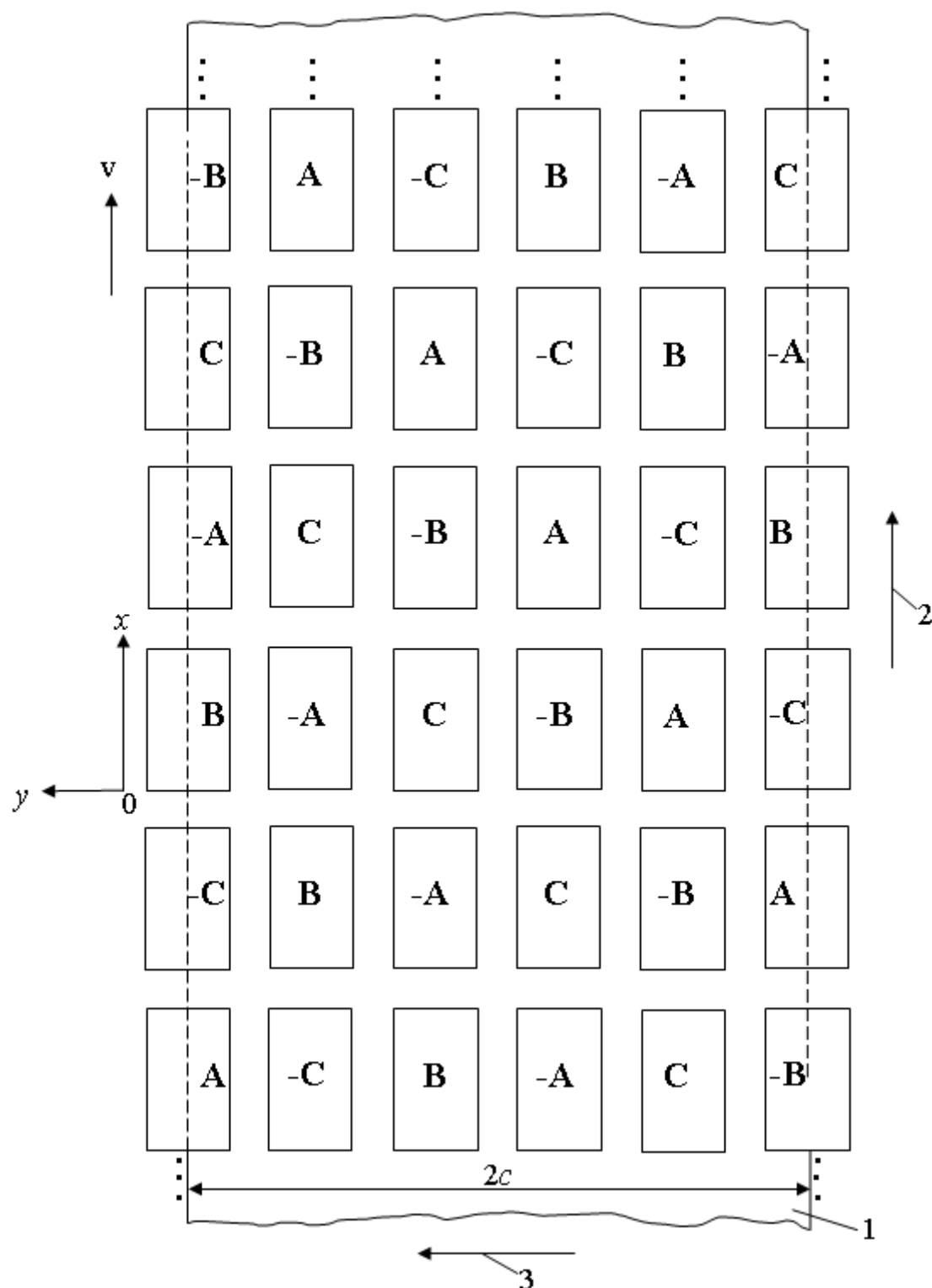


Рис. 2. Развертка на плоскости индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя

Полагаем, что расчетная модель двигателя содержит бесконечное число токовых контуров (Рис. 3) в продольном и поперечном направлениях. В этом случае не учитываются ограниченные размеры двигателя, как продольный, так и поперечный. Заметим, что поперечный размер ЦЛАД (Рис. 1, 2) и не должен учитываться, поскольку элементарные сердечники двигателя имеют замкнутые магнитные системы.

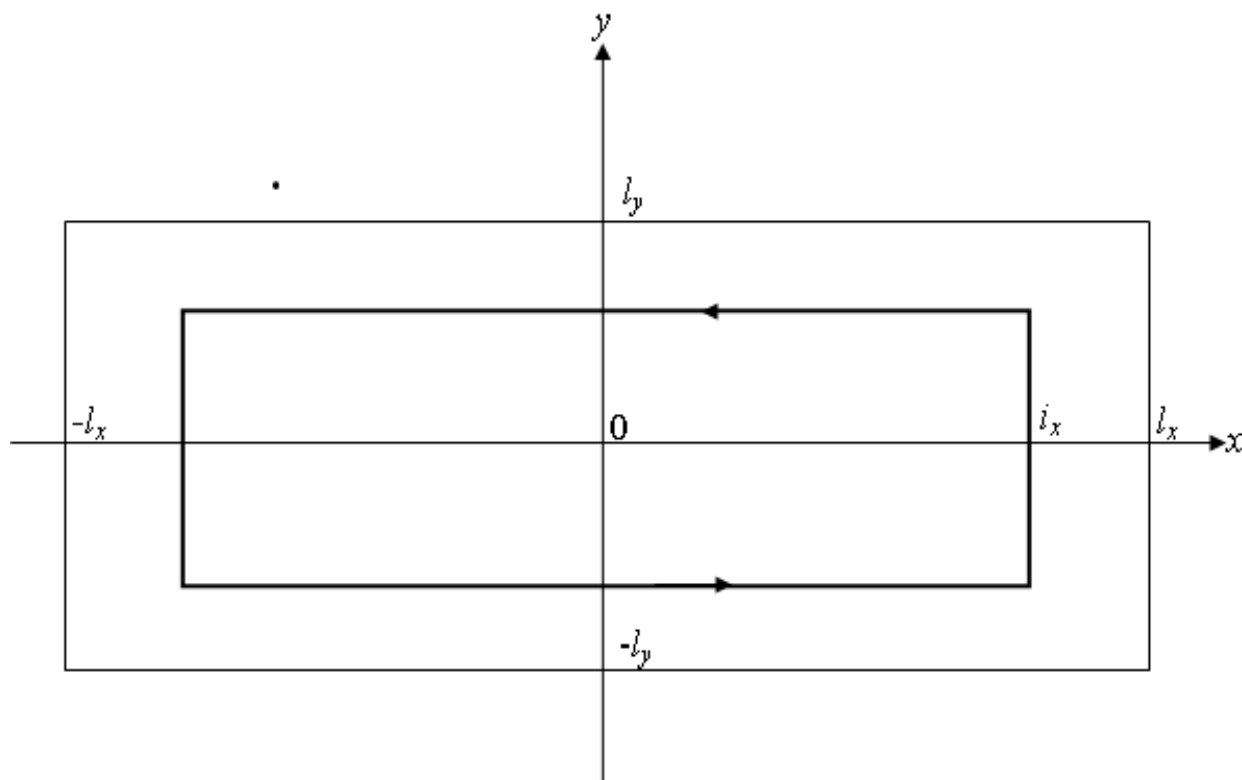


Рис. 3. Токовый контур индуктора цилиндрического ЛАД вращательно-поступательного перемещения

Ограниченность продольного размера ЦЛАД может быть учтена путем определения влияния продольного концевого эффекта, например, по методикам, изложенным в работах [18, 20]. Рассмотрим элементарный токовый контур (Рис. 3), участвующий в создании бегущего магнитного поля, взаимодействующего с вихревыми токами во вторичном элементе. Система токовых контуров бесконечна в направлениях « x » и « y ». Эта система токовых контуров периодична в плоскости « xy ». Таким образом, задача сводится к определению механического усилия, действующего на один контур. Результирующее усилие определяется суммированием элементарных сил. Расчетная модель ЦЛАД для определения осевого усилия для одного токового контура показана на Рис. 4. При анализе полагаем, что токовые контуры индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением

вторичного элемента размещены на сердечниках с бесконечно большой магнитной проводимостью (область 3).

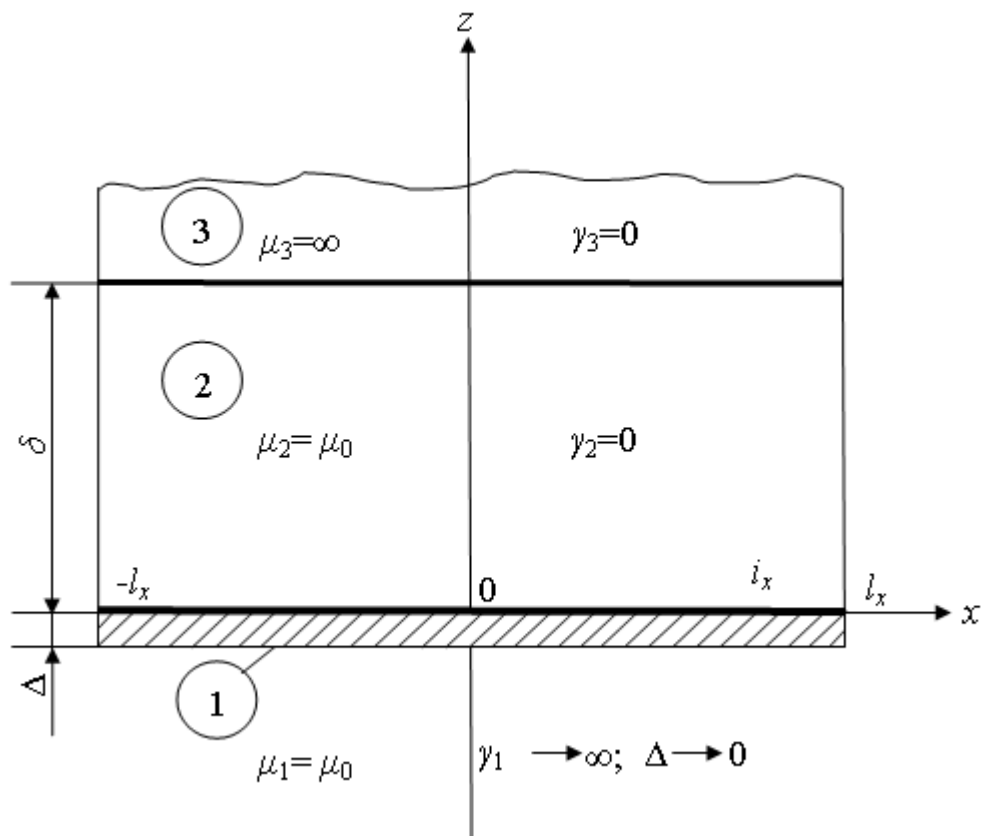


Рис. 4. Фрагмент расчетной модели ЦЛАД. δ – воздушный зазор; Δ – толщина вторичного элемента.

Токовый контур индуктора ЦЛАД (на рис. 4 показан жирной линией) размещен на расстоянии равном величине воздушного зазора δ (область 2) от электропроводящего вторичного элемента (заштрихован) с толщиной Δ (область 1), перемещающегося в осевом (продольном) направлении со скоростью v . Допустим, что ток движущегося вторичного элемента сосредоточен в бесконечно тонком слое на его поверхности, полагая его электропроводность равной бесконечности (Рис. 4).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ ЦЛАД

Для определения механического осевого усилия, действующего на элементарный токовый контур (Рис. 4), следует решить задачу магнитного

поля $H=H(x,y,z,t)$ в области 1 ($-\infty < z \leq 0$) и в области 2 ($0 \leq z < \delta$). Эти области разделены слоем вихревого тока $J_1 = J_1(x,y,t)$.

Система уравнений Максвелла, описывающих магнитное поле для расчетной модели ЦЛАД (Рис. 4):

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j}; \\ \operatorname{div} \bar{B} = 0; \\ \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt}; \\ \bar{j} = \gamma(\bar{E} + \bar{V} \cdot H). \end{cases}; \quad (1)$$

С учетом того, что:

$$B = \mu_0 H, \quad (2)$$

запишем уравнения Максвелла в виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \bar{H} = \bar{j}; \\ \operatorname{div} \bar{H} = 0; \\ \operatorname{rot} \bar{E} = -\mu_0 \frac{d\bar{H}}{dt}; \\ \bar{j} = \gamma(\bar{E} + \mu_0 \bar{V} \cdot H), \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{E}$ - напряженность электрического поля;

$\bar{H}$ - напряженность магнитного поля;

$\bar{j}$ - вектор плотности тока;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума;

$\bar{V}$ - скорость продольного перемещения вторичного элемента.

Для областей 1 и 2 (Рис. 4) выражения (3) приводят к следующим системам уравнений:

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}^1 = 0; \\ \operatorname{div} \bar{H}^1 = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{H}^2 = 0; \\ \operatorname{div} \bar{H}^2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

На границе раздела 2 и 3 областей (Рис. 4) при $z=\delta$ касательная напряженности магнитного поля соотносится с плотностью тока индуктора:

$$\bar{H}^2 \Big|_{z=\delta} = \bar{J}_1. \quad (6)$$

В первой области при бесконечно большом расстоянии от индуктора напряженность магнитного поля:

$$\bar{H}^1 \Big|_{z=-\infty} = 0. \quad (7)$$

Для плоскости, разделяющей области 1 и 2, справедливы следующие соотношения:

$$\bar{H}_z^1 \Big|_{z=0} = \bar{H}_z^2 \Big|_{z=0}; \quad (8)$$

$$(\bar{H}^1 - \bar{H}^2) \Big|_{z=0} = \bar{J}_1; \quad (9)$$

$$(\operatorname{rot} \bar{H}^{1,2})_z \Big|_{z=0} = 0. \quad (10)$$

Эти соотношения при заданном токе индуктора ЦЛАД определяют магнитное поле в воздушном зазоре.

Полагая, что ток в элементарных контурах изменяется синусоидально, решение уравнений (4) и (5) может быть представлено в виде:

$$\bar{H}^{1,2}(x, y, z, t) = \bar{H}^{1,2}(x, y, z) e^{j\omega t}. \quad (11)$$

С учетом (11) уравнения (4) и (5) принимают следующий вид:

$$\frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dx^2} + \frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dy^2} + \frac{d^2 \bar{H}^{1,2}}{dz^2} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{d^2 H_x^{1,2}}{dx} + \frac{d^2 H_y^{1,2}}{dy} + \frac{d^2 H_z^{1,2}}{dz} = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим область, приходящуюся на один элементарный контур в соответствии с Рис. 3 и 4: $-l_x \leq x \leq l_x$; $-l_y \leq y \leq l_y$; $-\infty \leq z \leq \delta$.

Пусть ток в контуре изменяется по синусоидальному закону:

$$I = I_m \cdot e^{j\omega t}. \quad (14)$$

С учетом этого (14) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \left. \bar{H}_x^2 \right|_{z=\delta} = I_m [\delta(x+l_x) - \delta(x-l_x)] [\gamma(y+l_y) - \gamma(y-l_y)], \\ \left. \bar{H}_y^2 \right|_{z=\delta} = I_m [\delta(y+l_y) - \delta(y-l_y)] [\gamma(x+l_x) - \gamma(x-l_x)], \end{cases} \quad (15)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака;

$\gamma(x)$ – единичная функция Хевисайда, для которой можно записать $\gamma(x)=0$ при $-\infty \leq x \leq 0$; $\gamma(x)=1$ при $0 < x < \infty$.

Рассмотренные выше соотношения относятся к элементарному контуру. Токи в бесконечной структуре элементарных контуров периодичны, что показано на Рис. 2. На основании соотношения (11) получим:

$$\begin{cases} H^{1,2}(x, y, z) = H^{1,2}(x + z l_x, y, z) e^{j \frac{\pi}{3}}; \\ H^{1,2}(x, y, z) = H^{1,2}(x, y + z l_y, z) e^{j \frac{\pi}{3}}. \end{cases} \quad (16)$$

Следовательно, продольный и поперечный сдвиг контуров по координатам $x \rightarrow x + z l_x$ и $y \rightarrow y + z l_y$, соответствует умножению искомых функций на $e^{j\pi/3}$. Это позволяет обойтись определением магнитного поля в областях, представленных на Рис. 3 и Рис. 4.

Из равенств (7) и (8) следует:

$$H_{x,y,z}^1 = 0 \quad \text{при } x \rightarrow -\infty; \quad (17)$$

$$H_z^1 = H_z^2 \quad \text{при } z=0. \quad (18)$$

Поддействуем оператором *rot* на равенство (9), полагая, что:

$$\bar{J}_1 = \gamma_2 \Delta [E_x \bar{e}_x + (E_y - \mu_0 V H_z) \bar{e}_y], \quad (19)$$

где e_x, e_y – единичные векторы.

Сравнивая составляющие $\text{rot} \bar{J}_1$ по оси «z» и учитывая равенство:

$$\text{rot} \bar{E} = -j\mu_0\omega \bar{H}, \quad (20)$$

Получим следующее соотношение на границе между областями 2 и 1:

$$\left(\frac{dH_z^2}{dz} - \frac{dH_z^1}{dz} \right) \Big|_{z=0} = \mu_0\gamma_2\Delta \left(j\omega H_z^{1,2} + V \frac{dH_y^{1,2}}{dx} \right) \Big|_{z=0}. \quad (21)$$

На основании (18) можно записать:

$$\frac{dH_x^{1,2}}{dy} \Big|_{z=0} = \frac{dH_y^{1,2}}{dx} \Big|_{z=0}. \quad (22)$$

Решение уравнений (12) с учетом условий (16) и (17) имеет вид:

$$\begin{cases} H_{x,y,z}^1(x,y,z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{H}_{x,y,zmn}^1 e^{C_{mn} \cdot z} e^{j(a_m x + b_n y)}; \\ H_{x,y,z}^2(x,y,z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\hat{H}_{1x,y,zmn}^2 \text{ch} C_{mn} \cdot z + \hat{H}_{2x,y,zmn}^2 \text{sh} C_{mn} z) \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}, \end{cases} \quad (23)$$

где a_m, b_n, C_{mn} – постоянные разделения переменных.

$$a_m = -\frac{(6_m - 1)\delta}{6l_x}, \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots; \quad (24)$$

$$b_n = -\frac{(6_n - 1)\delta}{6l_y}, \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots; \quad (25)$$

$$C_{mn} = \sqrt{a_m^2 + b_n^2}; \quad (26)$$

$\hat{H}_{x,y,zmn}^{1,1}, \dots$ – коэффициенты Фурье.

Коэффициенты Фурье находятся путем подстановки (23) в равенства (13), (15), (18), (21), (22). Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases}
ja_m \hat{H}_{xmn}^1 + jb_n \hat{H}_{ymn}^1 + C_{mn} \hat{H}_{zmn}^1 = 0; \\
ja_m \hat{H}_{1xmn}^2 + jb_n \hat{H}_{1ymn}^2 + C_{mn} \hat{H}_{1zmn}^2 = 0; \\
ja_m \hat{H}_{2xmn}^2 + jb_n \hat{H}_{2ymn}^2 + C_{mn} \hat{H}_{2zmn}^2 = 0; \\
chC_{mn} \delta \hat{H}_{1xmn}^2 + shC_{mn} \delta \hat{H}_{2xmn}^2 = \theta_{xmn}; \\
chC_{mn} \delta \hat{H}_{1ymn}^2 + shC_{mn} \delta \hat{H}_{2ymn}^2 = \theta_{ymn}; \\
\hat{H}_{zmn}^1 = \hat{H}_{1zmn}^2; \\
C_{mn} \hat{H}_{2zmn}^2 = \varepsilon_{mn} \hat{H}_{zmn}^1; \\
b_n \hat{H}_{xmn}^1 = a_m \hat{H}_{ymn}^1; \\
b_n \hat{H}_{1xmn}^2 = a_m \hat{H}_{1ymn}^2,
\end{cases} \quad (27)$$

где

$$\theta_{xmn} = \frac{jI_m \cdot \sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{l_x \cdot l_y \cdot b_n}; \quad (28)$$

$$\theta_{ymn} = \frac{jI_m \cdot \sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{l_x \cdot l_y \cdot a_m}; \quad (29)$$

$$\varepsilon_{mn} = C_{mn} + j\mu_0 \Delta \gamma_2 (\omega + a_m \cdot V). \quad (30)$$

Коэффициенты Фурье с учетом граничных условий (15):

$$\hat{H}_x^2 \Big|_{z=\delta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \theta_{xmn} \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}; \quad (31)$$

$$\hat{H}_y^2 \Big|_{z=\infty} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \theta_{ymn} \cdot e^{j(a_m x + b_n y)}. \quad (32)$$

Решая систему уравнений (27) относительно коэффициентов Фурье в области воздушного зазора цилиндрического линейного асинхронного двигателя (область 2), получаем:

$$\hat{H}_{1xmn}^2 = \frac{a_m \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} shC_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} chC_{mn} \cdot \delta}; \quad (33)$$

$$\hat{H}_{2xmn}^2 = \frac{b_n \cdot \theta_{ymn}}{a_m \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta} + \frac{1}{a_m} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta} \times \\ \times (C_{mn} + \varepsilon_{mn} \frac{b_n^2}{C_{mn}^2} \cdot \operatorname{cth} C_{mn} \cdot \delta); \quad (34)$$

$$\hat{H}_{1ymn}^2 = \frac{b_n \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}; \quad (35)$$

$$\hat{H}_{2ymn}^2 = \frac{\theta_{ymn}}{\operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta} - \frac{b_n \cdot \varepsilon_{mn}}{C_{mn}^2} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta} \times \operatorname{cth} C_{mn} \cdot \delta; \quad (36)$$

$$\hat{H}_{1zmn}^2 = -j \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}; \quad (37)$$

$$\hat{H}_{2zmn}^2 = -j \frac{\varepsilon_{mn}}{\gamma_{mn}} \cdot \frac{\theta_{xmn} \cdot a_m + \theta_{ymn} \cdot b_n}{C_{mn} \operatorname{sh} C_{mn} \cdot \delta + \varepsilon_{mn} \operatorname{ch} C_{mn} \cdot \delta}. \quad (38)$$

При синусоидально изменяющемся токе в контуре среднее значение механического осевого усилия может быть определено соотношением:

$$f = \frac{\mu_0}{2} \cdot \operatorname{Re}(\bar{j}_m \cdot \bar{H}_m^*), \quad (39)$$

где $\bar{j}_m$ - амплитудное значение тока;

$\bar{H}_m^*$ - самосопряженный комплекс амплитудного значения магнитной напряженности поля в воздушном зазоре.

Осевое продольное усилие, действующее на элементарный контур определится соотношением:

$$F_x = \frac{\mu_0 I_m}{2} \cdot \operatorname{Re} \left[\int_{-l_y}^{l_y} \left(H_z^2 \Big|_{z=l_x}^{z=\delta} - H_z^2 \Big|_{z=-l_x}^{z=\delta} \right) dy \right]. \quad (40)$$

Преобразуем (40), подставив в подынтегральные выражения полученные ранее ряды (23). После ряда преобразований получим соотношение для расчета осевого усилия ЦЛАД с вращательно-поступательным движением вторичного элемента:

$$F_x = 2\mu_0 \cdot I_m \cdot J_m \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\left(\hat{H}_{1zmn}^2 \cdot chC_{mn} \cdot \delta + \hat{H}_{2zmn}^2 \cdot shC_{mn} \cdot \delta \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sin a_m l_x \cdot \sin b_n l_y}{b_n} \right] \right\}. \quad (41)$$

Полученное соотношение позволяет определить осевое усилие цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента для случая, когда индуктор машины образован бесконечно большим числом элементарных соосно расположенных сердечников с трехфазными обмотками.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция цилиндрического линейного асинхронного двигателя, позволяющая получить вращательно-поступательное движение вторичного элемента, что расширяет функциональные возможности электрической машины.

2. На основе решения полевой задачи получено соотношение для расчета осевого механического усилия линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: https://b-ok.org/book/2901328/800f1a/?_ir=1
2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: ПГУПС, 2010. – 160 с. [Zaitsev AA, Talashin GN, Sokolova IaV. *Transport na magnitnom podvese*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: PSTU; 2010. 160 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.02.2019. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004907216>
3. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Antonov YuF, Zaitsev AA, editor. *Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnyye problem i tekhnicheskiye resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>

4. Зайцев А.А., Морозова Е.Н., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны / под ред. А.А. Зайцева. – СПб: НП-ПРИНТ, 2015. – 140 с. [Zaitsev AA, Morozova EN, Talashin GN, Sokolova YaV. *Magnitolevitatsionnyy transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. Zaitsev AA, editor. St. Petersburg: NP-PRINT; 2015. 140 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008161609>
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта и подходах к выбору специализации и физической основы высокоскоростного движения на направлении Москва–Санкт-Петербург// Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 4. – С. 26–33. [Zaitsev AA. O sovremennoy stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta i podkhodakh k vyboru spetsializatsii i fizicheskoy osnovy vysokoskorostnogo dvizheniya na napravlenii Moskva–Sankt-Peterburg. *Byulleten' ob'yedinennogo uchenogo soveta OAO RZHD*. 2016;4:26-33. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27472893>
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73. [Zaitsev AA. Magnitolevitatsionnye sistemy i tehnologii. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2014;5:69-73. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 03.02.2019. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21883966>
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. – 2014. – Т. 4. – № 41. – С. 5–15. [Antonov YuF, Zaitsev AA, Morozova EI. Issledovanie magnitodinamicheskoi levitatsii i elektrodinamicheskogo tormozheniya gruzovoi transportnoi platformy. *Izvestia PGUPS*. 2014;4(41):5-15. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 05.02.2019. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy>
8. Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование. – М.: ФГБОУ УМЦ ЖДТ, 2015. – 164 с. [Solomin VA, Solomin AV, Zamshina LL. *Lineinye asinkhronnye dvigateli dla vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava i ikh matematicheskoye modelirovanie*. Moscow: FGBOU UMC ZHDT; 2015. 164 p. (In Russ.)].
9. Isobe E. Linear Metro Transport System for the 21th Century. *Hitachi Review*. 1999;48(3):144-148.
10. Nonaka S, Higuchi T. Design of a Single Sided Linear Induction Motors for Urban Transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1988;37(3):167-173. doi: 10.1109/25.16543
11. Zhu K, Wang YM, Fan JF. Influence of Reaction Plate's Material and Configuration on the Performance of LIM Urban Transit Vehicle. *Urban Mass Transit*. 2007;10(9):55-57.
12. Nozaki Y, Koseki T, Masada E. Analysis of Linear Induction Motor for HSST and Linear Metro using Finite Difference Method. *5th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications*. Proc. LDIA-2005. pp. 168-171.
13. Fujii N, Hoshi T, Tanabe Y. Methods for Improving Efficiency of Linear Induction Motor for Urban Transit. *JSME International Journal, Series C*. 2004;47(2):512-517. doi: 10.1299/jsmec.47.512
14. He Y, Wang Y-S, Lu Q, et al. Design of Single-Sided Linear Induction Motor for Low-Speed Maglev Vehicle in 160 km/h and Variable Slip Frequency Control.

- Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):120-128. doi: 10.17816/transsyst201842120-128
15. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с. [Veselovsky ON, Konyaev AJu, Sarapulov FN. *Lineinye asinkhronnye dvigateli*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 256 p. (in Russ.)].
 16. Lee H-W, Lee SG, Park C, et al. Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes. *IJR International Journal of Railway*. 2008;1(1):6-11.
 17. Li M, Yang Z, Lin F, Sun H. Characteristics of Linear Induction Motor Considering Material of Reaction Plate Change. *Journal of Computers*. 2013;8(1):102-107. doi: 10.4304/jcp.8.1.102-107
 18. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 271 с. [Voldek AI. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom*. Leningrad: Energia; 1970. 271 p. (In Russ.)].
 19. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с. [Yamamura S. *Teoria lineinykh asinkhronnykh dvigatelei*. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 180 p. (In Russ.)]
 20. Boucheta A, Bousserhane IK, Hazzab A, Sicard P, Fellah MK. Speed Control of Linear Induction Motor Using Sliding Mode Controller Considering the End Effects. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2012;7(1):34-45. doi: 10.5370/JEET.2012.7.1.34

Сведения об авторах:

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор;

e-Library SPIN: 6885-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@rgups.ru

Замшина Лариса Леонидовна, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 8703-4347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;

e-Library SPIN: 6885-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Andrej V. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

e-Library SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@rgups.ru

Larisa L. Zamshina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

e-Library SPIN: 8703-4347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Nadejda A. Trubitsina Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
e-Library SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;
E-mail: ema@rgups.ru

Цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. Определение осевого усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя с вращательно-поступательным движением вторичного элемента // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 50–66. doi: 10.17816/transsyst20228150-66

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Zamshina LL, Trubitsina NA. название статьи Determination of the axial force of a cylindrical linear induction motor with rotational-translational movement of the secondary element. *Modern transportation systems and technologies*. 2022;8(1):50-66. doi: 10.17816/transsyst20228150-66