

Є. І. БАЙДА, О. Г. КОРОЛЬ

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З РУХОМИМ ІНДУКТОРОМ ТА ДВОМА ДИСКАМИ

**Загальний опис теми дослідження.** У статті проведено комплексне дослідження традиційних індукційно-динамічних механізмів (з одним диском та нерухомою котушкою) і мультиякірних індукційно-динамічних механізмів (лінійних імпульсних індукційних перетворювачів) з рухомою котушкою і двома дисками. **Актуальність теми.** Подібні індукційно-динамічні механізми широко застосовуються в різних галузях, зокрема, в електроапаратуванні, де швидкість є однією з найважливіших характеристик. **Метою статті** є порівняльний аналіз і уточнення характеристик традиційної індукційно-динамічної системи з одним диском і нерухомою котушкою і мультиякірної – з рухомою котушкою і двома дисками. **Метод досліджень, наукова новизна.** Розрахунки проведені на підставі рішення рівнянь електромагнітного поля і рівнянь для електричного кола котушки. **Практична значимість і основні висновки.** В ході розрахунків були визначені значення електромагнітної сили і імпульсу сили, що діють на рухомий диск, втрати енергії в системі і електромагнітна енергія системи. Результати дослідження показані у вигляді графіків, а саме, струм котушки і сумарна магнітна енергія для традиційного індукційно-динамічного механізму з одним диском і для мультиякірної – з рухомою котушкою і двома дисками, втрати Джоуля в нерухомій котушці і диску (в традиційній системі) і в рухомій котушці і двох дисках (в мультиякірній системі), імпульс сили і електромагнітна сила рухливої котушки (в мультиякірній системі) і рухомого диска (в традиційній і мультиякірній системі), сумарний імпульс рухомих частин індукційно-динамічного механізму з мультиякірною системою, а також електромагнітна сила і сумарна сила, що діє на рухомі частини індукційно-динамічного механізму з мультиякірною системою. Показано, що індукційно-динамічний механізм з двома дисками менш ефективний щодо електромагнітної сили, імпульсу і електромагнітної енергії, ніж індукційно-динамічний механізм традиційної компоновки.

**Ключові слова:** індукційно-динамічний механізм, мультиякірна система, традиційна система.

Е. И. БАЙДА, Е. Г. КОРОЛЬ

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ПОДВИЖНЫМ ИНДУКТОРОМ И ДВУМЯ ДИСКАМИ

**Общее описание темы исследования.** В статье проведено комплексное исследование традиционных индукционно-динамических механизмов (с одним диском и неподвижной катушкой) и мультиякорных индукционно-динамических механизмов (линейных импульсных индукционных преобразователей) с подвижной катушкой и двумя дисками. **Актуальность темы.** Подобные индукционно-динамические механизмы широко применяются в различных отраслях, в частности, в электроаппаратостроении, где быстродействие является одной из важнейших характеристик. **Целью статьи** является сравнительный анализ и уточнение характеристик традиционной индукционно-динамической системы с одним диском и неподвижной катушкой и мультиякорной – с подвижной катушкой и двумя дисками. **Метод исследований, научная новизна.** Расчеты проведены на основании решения уравнений электромагнитного поля и уравнений для электрической цепи катушки. **Практическая значимость и основные выводы.** В ходе расчетов были определены значения электромагнитной силы и импульса силы, действующих на подвижный диск, потери энергии в системе и электромагнитная энергия системы. Результаты исследования показаны в виде графиков, а именно, ток катушки и суммарная магнитная энергия для традиционного индукционно-динамического механизма с одним диском и для мультиякорного – с двумя дисками, потери Джоуля в неподвижной катушке и диске (в традиционной системе) и в подвижной катушке и двух дисках (в мультиякорной системе), импульс силы и электромагнитная сила подвижной катушки (в мультиякорной системе) и подвижного диска (в традиционной и мультиякорной системе), суммарный импульс подвижных частей индукционно-динамического механизма с мультиякорной системой, а также электромагнитная сила и суммарная сила, действующая на подвижные части индукционно-динамического механизма с мультиякорной системой. Показано, что индукционно-динамический механизм с двумя дисками менее эффективен по электромагнитной силе, импульсу и электромагнитной энергии, чем индукционно-динамический механизм традиционной компоновки.

**Ключевые слова:** индукционно-динамический механизм, мультиякорная система, традиционная система.

Ye.I. BAIDA, O.G. KOROL

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES IN INDUCTION-DYNAMIC CONVERTER WITH MOBILE INDUCTOR AND TWO DISKS

**General description of the research topic.** The article presents a comprehensive study of traditional induction-dynamic mechanisms (with one disk and a fixed coil) and multi-core induction-dynamic mechanisms (linear pulse induction converters) with a movable coil and two disks. **Actuality of the topic.** Such induction-dynamic mechanisms are widely used in various fields, in particular, in electrical apparatus industry, where speed is one of the most important characteristics. **The purpose of the article** is a comparative analysis and refinement of the characteristics of the traditional induction-dynamic system with one disk and a fixed coil and multi-core one with a movable coil and two disks. **Research method, scientific novelty.** The calculations are based on the solution of the equations of the electromagnetic field and the equations for the electric circuit of the coil. **Practical significance and main conclusions.** During the calculations, the values of electromagnetic force and force impulse acting on the moving disk, energy losses in the system and electromagnetic energy of the system are determined. The results of the study are presented in the form of graphs, namely, the coil current and total magnetic energy for a traditional induction-dynamic mechanism with one disk and for multi-core one with two disks, Joule losses in a fixed coil and disk (in a traditional system) and in a moving coil and two disks (in a multi-core system), force impulse and electromagnetic force of a moving coil (in a multi-core system) and a moving disk (in a traditional and a multi-core system) total impulse of the moving parts of the induction-dynamic mechanism with a multi-core system, as well as the electromagnetic force and the total force acting on the moving parts of the induction-dynamic mechanism with a multi-core system. It is shown that the induction-dynamic mechanism with two disks is less effective in terms of electromagnetic force, impulse and electromagnetic energy than the induction-dynamic mechanism of the traditional layout.

**Key words:** induction-dynamic mechanism, multi-core system, traditional system.

**Введение.** Индукционно-динамические механизмы (ИДМ) широко используются в различных электротехнических устройствах [1-4]. Они просты по конструкции, надежны и обладают высоким быстро-

действием.

В последнее время одним из направлений исследований ИДМ являются мультиякорные системы [5]. Причем, обоснованием для исследования таких систем

© Є.І. Байда, О.Г. Король, 2021

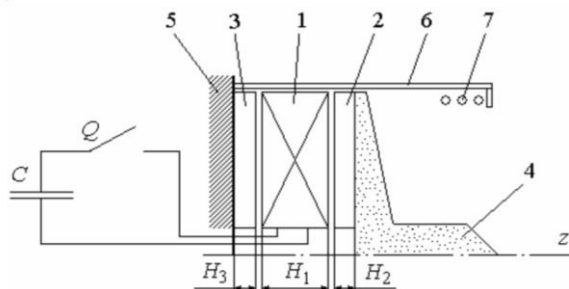
служит утверждение «поскольку в традиционной конструкции линейных импульсно-индукционных электромеханических преобразователей индукционно с диском взаимодействует только одна сторона катушки, то значительная часть магнитного поля с противоположной стороны катушки рассеивается в окружающее пространство и не используется для создания дополнительных электродинамических усилий (ЭДУ)». Дополнительные ЭДУ, повышающие эффективность системы, предполагается получить путем изменения конструкции, а именно, между неподвижным и подвижным дисками расположить подвижную катушку, которая «отталкиваясь от неподвижного диска, помогала бы разогнать подвижный диск».

В приведенной работе исследуется влияние различных параметров на движение подвижного диска, но сравнительный анализ традиционной индукционно-динамической системы и мультякорной системы [5] проведено недостаточно полно, а именно это и определяет жизнеспособность новой конструкции ИДМ. А утверждение о нерациональном использовании магнитного поля и получении дополнительных электромагнитных сил требует дополнительной проверки.

**Цель статьи** – сравнительный анализ и уточнение характеристик традиционной индукционно-динамической системы с одним диском и неподвижной катушкой и мультякорной – с подвижной катушкой и двумя дисками.

**Новизна.** К научной новизне статьи можно отнести комплексное исследование, уточнение физических процессов и сравнительный анализ традиционных и предлагаемых мультякорных ИДМ.

**Описание модели, основные допущения, схема подключения катушки и задача расчета.** На рис. 1 приведена расчетная схема мультякорной системы в цилиндрической системе координат такой, какой она рассматривается в [5].



1 – подвижная катушка; 2 – подвижный диск;  
3 – неподвижный диск; 4 – немагнитный ударный элемент;  
5 – немагнитное основание; 6 – направляющие;  
7 – возвратная пружина

Рис. 1. Расчетная схема индукционно-динамического механизма с подвижной катушкой и двумя дисками

#### Допущения, принимаемые при расчетах.

1. При расчетах не рассматривалось движение подвижных элементов системы, так как для анализа её работы вполне достаточно получаемых данных на основании решения системы уравнений электрической цепи и электромагнитного поля (анализ движения с различными массами катушки и диска планируется в дальнейшем).

2. Геометрические размеры катушки и дисков, а также расстояния между ними не изменялись.

3. Ёмкость конденсатора и начальное напряжение заряда конденсатора оставались неизменными.

4. Электрическая разрядная схема включает диод, подключенный параллельно катушке, что обеспечивает аperiодическую форму разрядного тока. Такая схема позволяет полностью использовать энергию конденсатора, не допуская его перезаряда.

Задачей расчета было определение значений электромагнитной силы и импульса силы, действующих на подвижный диск, потери энергии в системе и электромагнитная энергия системы.

**Расчетные соотношения.** Основным расчетным соотношением является система уравнений нестационарного электромагнитного поля вид которых зависит от параметров расчетной области. Граничные условия: отсутствия поля на внешней границе расчетной области и аксиальная симметрия поля по оси  $z$ .

Так как, катушка намотана относительно тонким проводом, то её область представлена как область с малой проводимостью и равномерно распределенной суммарной плотностью тока по поперечному сечению. В общем случае уравнение для векторного магнитного потенциала при отсутствии ферромагнитных элементов может быть записано

$$\sigma_j \cdot \frac{\partial \vec{A}_j}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \vec{A}_j) = \delta_{stj}, \quad (1)$$

где  $\sigma_j$  – удельная электропроводность материала;  $\vec{A}_j$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\delta_{stj} = \frac{i \cdot w}{S} \cdot \mathbf{e}_\varphi$  – сторонняя плотность тока катушки;  $i$  – ток в катушке;  $w$  – число витков;  $j=1 \dots N$  – число расчетных областей;  $S$  – площадь поперечного сечения катушки;  $\mathbf{e}_\varphi$  – орт.

Произведя соответствующие операции с (1) можно получить уравнение

$$\left( \begin{array}{c} \mu_0 \cdot \sigma_j \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} - \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} + \frac{A_\varphi + r \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial r}}{r^2} - \\ \frac{2 \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + r \cdot \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial r^2}}{r} \end{array} \right) \cdot \mathbf{e}_\varphi = \delta_{stj} \cdot \mathbf{e}_\varphi, \quad (2)$$

где  $A_\varphi$  – угловая составляющая векторного магнитного потенциала, зависящая от времени и координат;  $j$  – индекс, определяющий расчетную область.

Условия на границах будут определяться исходя из уравнения

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – вектор нормали к границе.

Система (2) будет различаться для каждой из расчетных областей (воздух, катушка, диск) значениями проводимости и правой частью уравнения (1), (2).

Система уравнений (2), (3) должна быть дополнена уравнением электрической цепи при нулевых началь-

ных условиях

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \cdot \delta + E; \\ \frac{dq}{dt} = i, \end{cases} \quad (4)$$

где  $L$  – внешняя индуктивность рассеяния;  $R$  – активное сопротивление проводов и катушки;  $i$  – ток катушки;  $U_{c0}$  – начальное напряжение на конденсаторе;  $E$  – противо-ЭДС катушки, зависящая от производной по времени от векторного магнитного потенциала;  $q$  – электрический заряд;  $\delta$  – единичная функция, моделирующая аperiодический разряд конденсатора

$$\delta = \begin{cases} 1, & \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) > 0 \\ 0, & \left( U_{c0} - \frac{q}{C} \right) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

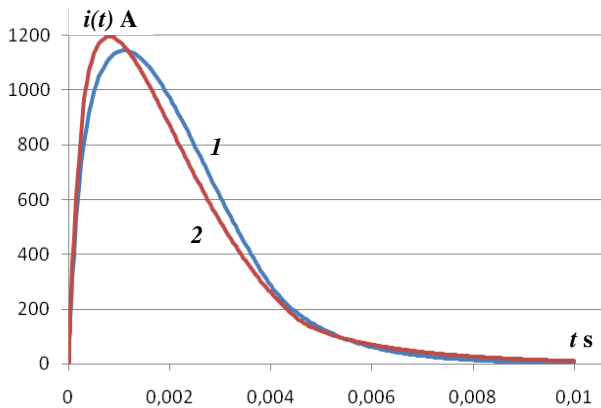
Противо-ЭДС катушки определялась как

$$E = - \frac{2 \cdot \pi \cdot w}{S} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_S A_\varphi \cdot r \cdot dr \cdot dz \right) \quad (6)$$

**Постоянные параметры.** Размеры катушки и подвижного диска: радиус 30 мм; толщина подвижного диска 1,75 мм. Катушка намотана проводом диаметром 1 мм. Число витков равно 93.

Электрические параметры модели: сопротивление катушки и проводов 0,2 Ом; начальное напряжение заряда конденсатора 400 В; ёмкость конденсатора 8000 мкФ; внешняя индуктивность рассеяния 10 мкГн.

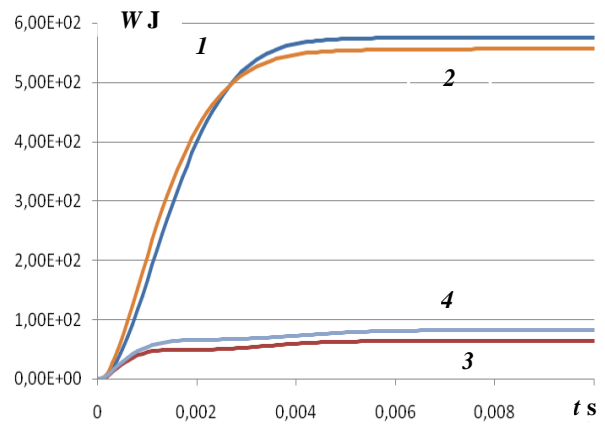
**Результаты расчетов.** Вначале был проведен расчет токов катушки. На рис. 2 показаны токи катушек в случае одного и двух дисков.



1 – традиционная ИДМ с одним диском и неподвижной катушкой; 2 – мультиякорная система с подвижной катушкой и двумя дисками  
Рис. 2. Токи катушки

Как видно из рис. 2, ток в случае двух дисков больше. Такая амплитуда и форма тока обусловлена меньшей индуктивностью системы, которая увеличивает ток и уменьшает постоянную времени цепи.

Для оценки эффективности системы на рис. 3 представлены значения тепловых потерь в системе (интегралы Джоуля).



1, 3 – потери в неподвижной катушке и диске (в традиционной системе); 2, 4 – потери в подвижной катушке и двух дисках (в мультиякорной системе)  
Рис. 3. Потери Джоуля в системе

Максимальные значения потерь: а) катушка – один диск 575,3 Дж; катушка – два диска 556,2 Дж; б) один диск – 64 Дж; два диска суммарные – 82,3 Дж.

Суммарные потери в системе с двумя дисками больше, чем в системе с одним диском. Однако тепловые потери в системах отличаются незначительно – 639,2 Дж и 638,95 Дж.

Так как одной из основных характеристик ИДМ является значение скорости подвижного элемента, то следующим этапом расчетов было определение импульса подвижных элементов систем, который определяется по формуле

$$S = \int_t F \cdot dt, \quad (7)$$

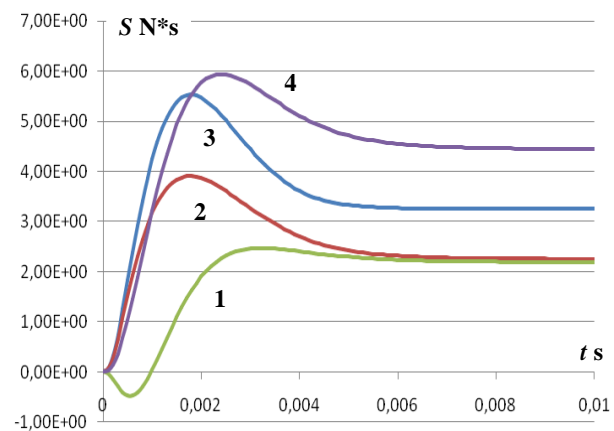
где  $S$  – импульс силы;  $F$  – сила.

Зная значение импульса, можно оценить значение скорости подвижных элементов и кинетическую энергию движущихся частей

$$v = \frac{S}{m}, \quad W = \frac{S^2}{2 \cdot m}, \quad (8)$$

где  $v$  – скорость;  $m$  – масса движущихся частей.

На рис. 4 показаны значения импульса системы.



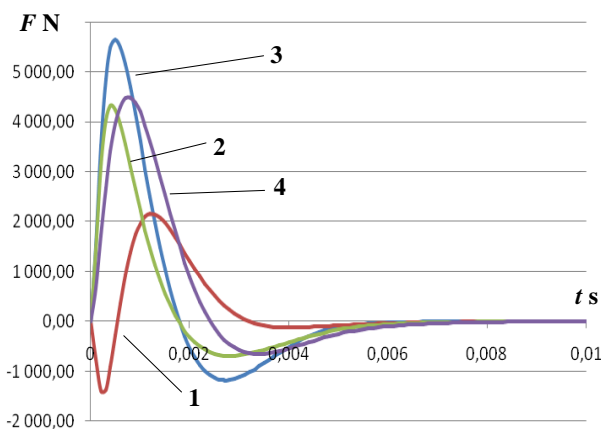
1 – подвижная катушка в мультиякорной ИДМ; 2 – подвижный диск в мультиякорной ИДМ; 3 – диск в традиционной ИДМ; 4 – суммарный импульс подвижных частей ИДМ с мультиякорной системой

Рис. 4. Значение импульса силы системы

Как видно из рис. 4, в начальные моменты времени на катушку действует отрицательный импульс, но суммарный импульс катушки и подвижного диска в мультякорной системе больше, чем в ИДМ традиционной компоновки.

Что касается скорости разгона. В мультякорной системе скорость подвижных элементов будет меньше: если диск не связан с катушкой – его импульс меньше, чем у ИДМ традиционной компоновки; если диск и катушка единое целое, то скорость будет определяться суммарной массой движущихся элементов (диска с ударным элементом и массой катушки). Предварительный анализ (по значению максимального значения импульса) показывает, что скорость диска и катушки в мультякорной системе приближается к скорости движения диска в ИДМ традиционной компоновки только в том случае, когда масса диска и ударника много больше массы катушки. Для всех остальных вариантов скорость движения якоря в мультякорной системе меньше, чем в традиционной.

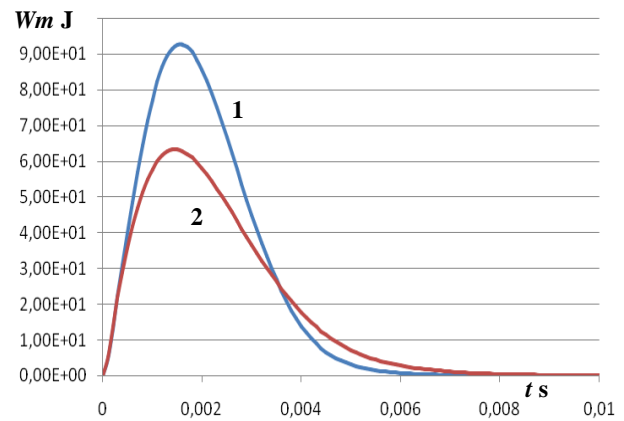
Данные по электромагнитной силе, действующей на подвижные элементы первой и второй системы, показаны на рис. 5. Наибольшее значение электромагнитной силы наблюдается в ИДМ традиционной компоновки. Необходимо отметить, что и отрицательное значение силы в этом случае наибольшее, однако, как правило, к этому времени (отрицательное значение силы) подвижные элементы системы успевают отойти от катушки на достаточное расстояние и замедление на подвижных элементах сказывается незначительно.



1 – подвижная катушка в мультякорной ИДМ;  
2 – подвижный диск в мультякорной ИДМ;  
3 – диск в традиционной ИДМ;  
4 – суммарная сила, действующая на подвижные части ИДМ с мультякорной системой

Рис. 5. Значение электромагнитной силы

Последним расчетом было определение суммарной магнитной энергии систем.



1 – традиционная ИДМ с одним диском и неподвижной катушкой; 2 – мультякорная система с подвижной катушкой и двумя дисками

Рис. 6. Суммарная магнитная энергия системы

Как следует из рис. 6, энергия, запасаемая в магнитном поле системы для традиционной конструкции ИДМ больше, что и обуславливает большую электромагнитную силу.

### Выводы

1. Проведенные расчеты показывают, что по суммарным тепловым потерям две системы практически эквивалентны.
2. При одной и той же массе подвижного диска квадрат импульса силы в традиционной конструкции ИДМ больше, чем в мультякорной примерно в 1,9 раза, что определяет большую скорость движения.
3. Если имеется несимметричность расположения катушки между дисками, то на подвижную катушку в начальные моменты времени действует сила, направление которой зависит от соотношения расстояний до дисков.
4. Электромагнитная сила, действующая на подвижный диск, в ИДМ традиционной конструкции больше по величине и длительней по воздействию, чем в мультякорной системе.
5. Электромагнитная энергия поля (производная от которой по величине перемещения и определяет электромагнитную силу) так же больше для ИДМ традиционной конструкции.
6. Подвижная катушка является одним из самых ненадежных элементов конструкции, так как на неё и токоподводы к ней действует ускорение сотни единиц ускорения свободного падения. Особенно подвержены силовому воздействию места крепления выводов к катушке.
7. Мультякорная система не имеет особых преимуществ перед ИДМ традиционной конструкции, по крайней мере, для исследуемой модели.

### Список литературы

1. Болух В.Ф., Кашанский Ю.В., Щукин И.С. Влияние геометрических параметров индуктора и якоря на показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя электродинамического типа. *Электротехника і електромеханіка*, – 2019. – №3. – С. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02.
2. Байда Е.И. Математическое моделирование индукционно-динамических систем. *Электротехника і електромеханіка*, 2009. – №5. – С. 13–16. doi: 10.20998/2074-272X.2009.5.02.

3. WeijieWen, YulongHuang, Member, IEEE, MohmmadAl-Dweikat, Zu'anZhang, TiehanCheng, ShutongGaoandWeidongLiu. Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015. P. 2553–2560. doi: **10.1109/TPWRD.2015.2409122**.
4. Теория электрических аппаратов. Учебник для втузов по спец. "Электрические аппараты" / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.А. Иванов и др. Под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. 312 с.
5. В.Ф. Болюх, А.И. Кочерга, И.С. Шукин. Электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором и двумя якорями. *Электротехника і електромеханіка*, – 2018. – № 2. – С. 11–17. doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
6. Рамо С., Уинерри Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. Перевод с английского. Москва, ОГИЗ, 1948. 631 с.
2. BaidaE.I. *Matematicheskoe modelirovanie induktsionno-dinamicheskikh sistem*. [Mathematical modeling of induction-dynamic systems]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2009. №5, p.p. 13–16.
3. Weijie Wen, Yulong Huang, Member, IEEE, Mohmmad Al-Dweikat, Zu'an Zhang, Tiehan Cheng, Shutong Gao and Weidong Liu. *Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches*. [Research on Operating Mechanism for Ultra-fast 40.5kV Vacuum Switches]. IEEE Power & Energy Society, 24 March 2015, p.p. 2553–2560. doi:10.1109/TPWRD.2015.2409122.
4. *Teoriya elektricheskikh apparatov. Uchebnik dlia vtuzov po spets. "Elektricheskie apparaty"*. [Theory of electrical apparatus. Textbook for high schools on special. "Electrical apparatus"]. G.N. Aleksandrov, V.V. Borisov, V.A. Ivanov i dr. Pod red. prof. G.N. Aleksandrova. – Moscow: Vysshiaia shkola, 1985. 312 p.
5. V.F. Bolyuh, A.I. Kocherga, I.S. Schukin. *Elektromekhanicheskie protsessy v lineynom impulsno-induktsionnom elektromekhanicheskom preobrazovatele s podvizhnyim induktorom i dvumyayakoryami*. [Electromechanical processes in a linear pulse-induction electromechanical converter with a movable inductor and two armatures]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, – 2018. – № 2. – P. 11–17. doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
6. Ramo S., UinerriDzh. *Poliavolny v sovremennoi radiotekhnike*. [Fields and waves in modern radio engineering]. *Perevod s angliiskogo*. Moscow, OGIZ, 1948. 631 p.

#### References (transliterated)

1. Boliukh V.F., Kashanskii Iu.V., Shchukin I.S. *Vlianie geometricheskikh parametrov induktora i iakoria na pokazateli lineinogo impul'sno goelektromekhanicheskogo preobrazovatelja elektrodinamicheskogo tipa*. [The influence of the geometric parameters of the inductor and the armature on the performance of a linear pulse electromechanical transducer of electrodynamic type]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, – 2019. – № 3. – P. 11–17. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02

Поступила (received) 15.04.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Baida Evgen Ivanovich)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних апаратів, м. Харків, e-mail: baida.kpi@gmail.com.

**Король Олена Геннадіївна (Король Елена Геннадьевна, Korol Olena Gennadiivna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: korolelgn@gmail.com