

УДК 629.76.620.17

**В. Т. ЧЕМЕРИС, І. О. БОРОДІЙ****ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ НЕСТАЦІОНАРНИМИ ФІЗИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В СИЛОВИХ ПРИБОРАХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

Розглянуто особливості нестационарних фізичних процесів, що супроводжують електромеханічне перетворення енергії, та їхній взаємозв'язок. Перелік цих процесів різниться в залежності від того, чи працюють пристрої переважно у стаціонарних режимах, чи для них є типовим перехідний (імпульсний) або повторний короткочасний режим навантаження. Крім основних виявів дії електричного струму, тобто джоулевої дисипації та пондеромоторних сил, специфіка окремих пристроїв вимагає враховувати такі явища, як нестационарна дифузія електромагнітного поля, дифузія тепла або дифузія речовини (як в системах індукційного переплаву металів тощо). Взаємозв'язок та перехресні впливи цих процесів представлені у статті у вигляді розгорнутої блок-схеми, що відображає найбільш суттєві явища, що потребують першочергової уваги при аналізі або моделюванні імпульсних електромеханічних пристроїв (генераторів імпульсного струму або електромагнітних прискорювачів масивних тіл).

**Ключові слова:** електромеханічні перетворювачі, нестационарна дифузія поля, дифузія тепла, дифузія речовини, взаємозв'язок процесів, перехресний вплив, блок-схема.

Рассмотрены особенности нестационарных физических процессов, сопровождающих электромеханическое преобразование энергии, и взаимосвязь между ними. Перечень этих процессов различен в зависимости от того, работают ли устройства преимущественно в стационарных режимах, или же для них типичным является переходный (импульсный) или повторно-кратковременный режим нагрузки. Помимо основных проявлений воздействия электрического тока, как джоулева диссипация и пондеромоторные силы, специфика отдельных устройств требует учета таких явлений, как нестационарная диффузия электромагнитного поля, диффузия тепла или диффузия вещества (как в системах индукционной переплавки металлов и т.п.). Взаимосвязь и перекрестные влияния этих процессов представлены в статье в виде развернутой блок-схемы, которая отображает наиболее существенные явления, требующие первоочередного внимания при анализе или моделировании импульсных электромеханических устройств (генераторов импульсного тока или электромагнитных ускорителей макротел).

**Ключевые слова:** электромеханические преобразователи, нестационарная диффузия поля, диффузия тепла, диффузия вещества, взаимосвязь процессов, перекрестное влияние, блок-схема.

The purpose of work is to consider the specifics and inter-connections of non-stationary physical processes which accompany the electromechanical energy conversion and to attract the attention of researchers to their analysis. The list of these processes is different in dependence on the time schedule of devices operation: or this is mainly stationary mode of operation or this is transient (impulse) / or maybe short-time periodical interrupted mode of loading. Beside of the main effects of electrical current action, as a Joule's dissipation and ponderomotive forces, the specifics of some devices need to take into account such phenomena as non-stationary diffusion of electromagnetic field, heat diffusion or diffusion of substance (as in the systems of induction re-melting of metals etc.). Methodology of work consists of the inclusion into the structure of new algorithms of electromechanical devices simulation the secondary effects which are able to have influence on the operational parameters of devices and their lifetime and workability. Is result of previous analysis the mutual influence and cross coupling of these processes have been represented in this paper in the view of extended block diagram which covered the most essential phenomena for the first-priority attention at the analysis or simulation of the electromechanical devices with short-time mode of operation (as chock generators of pulsed current or electromagnetic accelerators of macrobodies). Originality of paper consists of the clear demonstration of cross connection between different unstationary physical processes which occur in the electromechanical energy converters. Proposed block-scheme of the information exchange between functional blocks of multiscale algorithm shows the way to investigate the energy conversion in parallel with calculation of this process influence on the properties of materials which have been used in design of device. The practical use of developed block-scheme is the assistance for investigators in the creation of multi-physical algorithms of simulation for the processes of energy conversion in the electromechanical devices.

**Keywords:** electromechanical converters, non-stationary field diffusion, heat diffusion, diffusion of substance, interconnection of processes, cross coupling, block diagram.

**Вступ.** Зростання потужності комп'ютерної техніки, доступної для дослідників, разом з поширенням сучасних програм для моделювання фізичних полів та різноманітних електромагнітних пристроїв, зробило можливим відійти від суто аналітичних методів аналізу процесів електромеханічного перетворення енергії й перейти до комп'ютерного моделювання робочих процесів з врахуванням усього комплексу фізичних явищ, які можуть супроводжувати ці процеси. Передусім це врахування нелінійних властивостей феромагнетиків, залежності показників електропровідності провідників від температури й тим самим від локальних параметрів густини струму, яка визначається на підставі вирішення рівнянь електромагнітного поля. Додамо сюди врахування нерівномірного нагрівання активних елементів пристрою, для чого потрібно розрахувати потоки тепла від більш нагрітих зон до менш нагрітих. У пристроях зі стаціонарним режимом роботи для цього достатньо побудувати числову

систему рівнянь електромагнітного поля спільно з рівнянням теплопровідності, що враховує локальні джерела тепла, використовуючи при цьому функціональну залежність локальних показників електропровідності від температури. Такі підходи неодноразово були здійснені й описані у науковій літературі (наприклад, [1]). Проте існує окрема категорія електромеханічних пристроїв технологічного або спеціального призначення, які діють у форсованих режимах, тому для них більш типовими є режими повторно короткочасної роботи (прикладом може бути обладнання для зварювання металів електричним струмом тощо). Окремі пристрої працюють виключно в перехідному режимі, як от електромагнітні штампи та преси, ударні механізми для будівельної індустрії та ін., які є принципово імпульсними пристроями. Для них поняття стаціонарного режиму не може бути застосоване, бо їхній робочий режим цілком базується на нестационарних явищах. Сюди доцільно також



майбутніх розрахункових моделей. Роль імпульсних процесів в пристроях електромеханіки заслуговує окремого обговорення. Насправді електромеханічний перетворювач енергії будь-якого типу, навіть призначений для роботи у стаціонарних режимах, базується на послідовності окремих актів імпульсної взаємодії первинної електромагнітної системи з рухомим вторинним елементом. Це справедливо і для традиційних колекторних машин постійного струму, і для уніполярних машин, бо в кожній з них активний провідник вторинного елемента (якоря) протягом відносно короткого часу перебуває в зоні дії електромагнітних сил, після чого він вибуває з цієї зони і замінюється іншим провідником. Дещо інакше виглядає процес взаємодії в асинхронних машинах, де на перший погляд процес електромеханічного перетворення енергії іде безперервно, але при уважному розгляді ми виявляємо, що на кожному періоді зміни первинного поля відбувається процес дифузії поля у провідник вторинного елемента, рух якого іде з іншою швидкістю, ніж рух первинного поля, тому в кожному акті взаємодії беруть участь весь час нові елементи вторинного провідника, але завдяки осьовій симетрії машини цей процес охоплює весь об'єм рухомого активного провідника. Таким чином, хоча запропонована в цій роботі схема взаємозв'язку між різними нестационарними фізичними полями була розроблена переважно для аналізу машин імпульсної дії та імпульсних електромагнітів, розгляд взаємопов'язаних процесів імпульсного характеру може бути корисним і для машин стаціонарної дії, оскільки дозволяє поглиблено, з точки зору локальних взаємодій, поглянути на їхній робочий процес.

**Опис блок-схеми взаємозв'язку нестационарних фізичних процесів.** Внутрішній зв'язок між різними нестационарними фізичними процесами, що мають місце у пристроях з обмеженою швидкістю, відображений на блок-схемі рис. 1. Будемо вважати, що швидкість зміни магнітних полів у пристроях не переважає 1 Тл/мксек, що дозволяє обмежитися аналізом нестационарних полів з позиції теорії дифузії і не брати до уваги хвильові явища, які виявляють себе при швидкозмінних полях високої частоти. Центральні блоки на рис. 1 - це блок рівнянь електромагнітного поля (зрозуміло, з врахуванням матеріальних рівнянь середовища), блок рівнянь теплопередачі, які дозволяють визначити тепловий стан активних елементів пристрою, та блок рівнянь руху вторинного елемента (з врахуванням всіх сил, здатних протидіяти рухові). Дані, що служать вихідними для кожного з цих блоків, надходять в суміжні блоки. Це в першу чергу дані про генерацію Джоулевого тепла електричним струмом, та про електродинамічні сили, які здатні рухати вторинний елемент пристрою. Ці дані мають бути враховані в блоці теплових рівнянь і в блоці рівнянь руху. В свою чергу, блок рівнянь електромагнітного поля і блок теплових рівнянь мають одержувати інформацію про швидкість руху рухомих елементів від блоку рівнянь руху. Для повного опису всіх фізичних характеристик

вторинного елемента пристрою в загальному випадку необхідно бути готовими не тільки до опису макроскопічних рухів, але й до можливих акустичних коливань, збуджених під дією електродинамічних сил. Ось чому в блоці рівнянь руху передбачається можливість використання рівнянь акустики для твердих тіл. Для електромагнітних пристроїв, які працюють з розплавами металів в якості вторинного елемента, мають бути використані рівняння гідродинаміки, або точніше, магнітної гідродинаміки, оскільки рух розплавленого металу здатний суттєво впливати на розподіл величин електромагнітного поля.

В імпульсних пристроях, де можливе виникнення критичних режимів нагрівання вторинного елемента з переходом частини його об'єму у розплавлений стан, необхідно брати до уваги наявність перехідної зони з пластичними властивостями і мати можливість окремо визначати в ході рішення рівнянь розміри та відносні об'єми твердої частини, пластичної зони і зони розплаву. Для цього мають бути залучені рівняння агрегатного стану матеріалу вторинного елемента, вхідною інформацією для котрих повинні служити дані про температурний стан та структурні особливості вторинного елемента на кожен момент часу. Маються на увазі можливі зміни розмірних співвідношень між твердою, пластичною та розплавленою зонами а також можлива зміна форми пластичних зон під дією електромагнітних сил. Результати розв'язку теплових рівнянь слугують первинною інформацією для оцінки термомеханічного стану всіх елементів конструкції, що несуть механічні навантаження. Для обчислення можливих деформацій та переміщення елементів передбачається блок рівнянь для поля механічних напружень, який у свою чергу має отримувати дані про параметри міцності матеріалів, уточнені на основі даних про тепловий стан елементів. Для елементів, що перебувають в контакті (запресовані деталі пакету статора, поверхні ковзаючого контакту в контактних системах передачі струму на рухомий елемент, контактні поверхні деталей електроізоляції тощо) і одночасно перебувають під дією електричних струмів та магнітних полів, паралельно з аналізом електродинамічних процесів може бути проведений аналіз явищ перенесення речовини з врахуванням впливу електромагнітних полів. Для цього дані про величини електромагнітного поля, температуру та швидкість руху елементів контакту передаються в блок уточнення коефіцієнтів дифузії стосовно до умов роботи контакту і далі використовуються для вирішення задач дифузії речовини на поверхнях контактів. При наявності іскріння з утворенням мікроплазми в контактних проміжках додатково повинні бути залучені характеристики інтенсивності теплового та оптичного випромінювання з контактних поверхонь та характеристики мікроплазменних утворень. Кінцевим результатом такого складного алгоритму може бути інформація про існування загроз поверхневого або об'ємного руйнування активних елементів пристрою. Для оцінки ймовірності такого

руйнування вся інформація про діючі сили, температури, деформації, переміщення та швидкість руху робочих елементів, так само, як інформація про

агрегатний стан активних елементів, повинні надходити в блок обробки критеріїв руйнування.

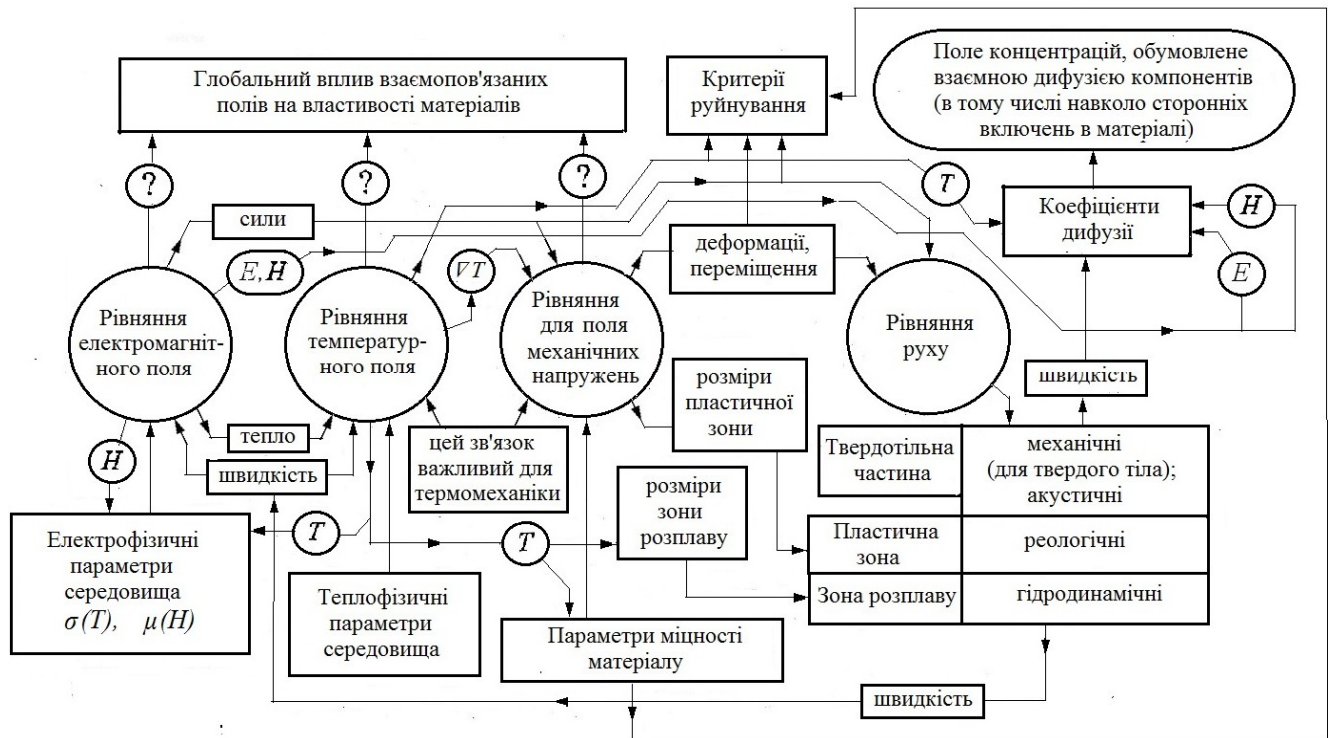


Рис.1 — Взаємозв'язок фізичних полів в імпульсних магнітах та електромеханічних перетворювачах енергії

Реалізація всього комплексу взаємозв'язків між названими нестационарними явищами в якості нового фундаментального результату здатна збагатити наукову інформацію про глобальний вплив взаємопов'язаних полів на властивості матеріалів, що використовуються в конструкціях імпульсних систем. Те, що ця інформація сьогодні є недостатньою, відображено на блок-схемі знаками запитання на шляху від головних блоків задачі, тобто від блоку рівнянь електромагнітного поля, блоку температурних полів та блоку напруженого стану речовини.

Стосовно імпульсних магнітів необхідно зазначити, що хоча вони можуть не мати вторинного рухомого елемента, для них проблема деформацій первинної обмотки, її акустичних коливань, як і проблеми міцності і термічної стійкості провідників, актуальна так само, як і для імпульсних електромеханічних перетворювачів енергії.

Ще більшою мірою це стосується імпульсних індукційних накопичувачів енергії, що застосовуються в техніці фізичного експеримента. Вони часто мають вторинну обмотку (це накопичувачі трансформаторного типу), тому проблема електродинамічних процесів та їхніх наслідків з точки зору довговічності конструкції зберігає свою актуальність.

**Підсумок роботи та висновки.** Запропонована в роботі структурна схема для побудови розвинутого алгоритму розрахунків процесів імпульсного електромеханічного перетворення енергії звертає увагу

дослідників на нові можливості вивчення мультифізичних процесів, що відкриваються з розвитком багатомасштабних методів моделювання. Якщо раніше типовою схемою розрахунку електромеханічних пристроїв та систем вважалася схема, що відображала головний канал енергоперетворення, то з появою багатомасштабних алгоритмів з'являється можливість врахування багатьох супутніх процесів (які в механіці називають „вторинними роботами”). Це дозволяє передбачати деякі віддалені наслідки впливу цих процесів на довговічність та робочі характеристики досліджуваних пристроїв. Це особливо важливо для силових пристроїв, в складі яких є елементи з підвищеними електромагнітними та механічними навантаженнями, близькими до гранично допустимих.

Розвинуті алгоритми врахування взаємопов'язаних фізичних процесів дозволять одержувати оцінки довговічності відповідальних активних елементів конструкції з використанням критеріїв руйнування. В той же час питання про глобальний вплив взаємопов'язаних фізичних процесів, що супроводжують імпульсне електромеханічне перетворення енергії, на властивості матеріалів, з яких виготовляються активні елементи перетворювачів, можна вважати відкритим і таким, яке потребує подальших досліджень і накопичення інформації. Особливості моделювання мультифізичних процесів з використанням сучасного

комерційного програмного забезпечення розглядалися в роботі [31].

#### Список літератури

1. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – Киев : Институт электродинамики Национальной Академии наук Украины, 1999. – 363 с.
2. Глебов И. А. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия / И. А. Глебов, Э. Г. Кашарский, Ф. Г. Рутберг. – Л. : Наука, 1985. – 224 с.
3. Дружинин А. С. Компрессионные генераторы / А. С. Дружинин, В. Г. Кучинский, Б. А. Ларионов // Физика и техника импульсных систем. ред. Е. П. Велихов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – С. 280-295.
4. Doyle M. R. Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS / M. R. Doyle, D. J. Samuel, T. Conway, and R. R. Klimowski // IEEE Trans. on Magnetics. – Jan. 1995. Vol. 31, No. 1, – P. 528-533.
5. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range / B. Reck // IEEE Trans. on Magnetics. – Jan. 2003, Vol. 39, No.1, P. 310-313.
6. Мильх В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя / В. И. Мильх // Электротехника. – 1994. № 10. – С. 3-9.
7. Златин Н. А. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н. А. Златин, А. П. Красильщиков, Г. И. Мишин, Н. Н. Попов. – М. : Наука, 1974. – 344 с.
8. Таев И. С. Основы теории электрических аппаратов / ред. И. С. Таев. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
9. Кришук Н. Г. Математическое моделирование электромагнитных полей и джоулевых потерь в рельсовом ускорителе / Н. Г. Кришук, Ю. Н. Васковский, Л. Н. Бондарь. // Техническая электродинамика, 1994, № 1. – С 42-46.
10. Подольцев А. Д. Компьютерное моделирование электромагнитных и тепловых процессов в технологических установках и материалах со сложной структурой / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць.– К. : ІЕД НАНУ. – 2005. № 2(11), ч. 2. – С. 14-17.
11. Young F. J. Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers / F. J. Young and W. F. Hughes // IEEE Trans. on Magnetics. – Jan. 1982. vol. 18. no. 1. – P. 33-41.
12. Thiagarajan V. A magnetofluid mechanical model to describe rail-armature interface phenomena / V. Thiagarajan and K.-T. Hsieh. // IEEE Trans. on Magnetics. – Jan. 2007. vol. 43. no.1. –P. 198-203.
13. Chemerys V. T. Rail accelerator as continuous commutation process / V. T. Chemerys // IEEE Trans. on Plasma Science. – March 2015. Vol.43. No. 3. Part II. –P. 869-877.
14. Pavliotis G. A. Multiscale methods: Averaging and Homogenization / G. A. Pavliotis, A. M. Stuart. – Berlin, etc.: Springer, 2007. – 307 p.
15. Tartar L. The general theory of homogenization / L. Tartar. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. – 2009. – 470 p.
16. Подольцев А. Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – Киев: Институт электродинамики Национальной Академии наук Украины. – 2011. – 256 с.
17. Санчес-Паленсия Э. Неоднородные среды и теория колебаний / Э. Санчес-Паленсия – М. : Мир, 1984. – 472 с.
18. Бахвалов Н. С. Осреднение процессов в периодических структурах / Н. С. Бахвалов, Г. П. Панасенко. – Москва: Наука, Физматлит, 1964. – 352 с.
19. Бардзокас Д. И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д. И. Бардзокас, А. И. Зобнин. – М. : Эдиториал УРСС. – 2003. – 376 с.
20. El Feddi. Homogenization technique for Maxwell equations in periodic structures / El Feddi M., Ren Z., Razek A., Bossavit A. // IEEE Trans. on Magnetics. – 1997. Vol. 33, No. 2. P. 1382-1385.
21. Зобнин А. И. Уравнения Максвелла для неоднородной среды с периодической структурой / Зобнин А. И., Кудрявцев Б. А., Партон В. З. // Изв. АН Армянской ССР. – 1990. Т. 43, № 1 (Механика). –С. 19-26.
22. Shelukhin V. V. Frequency dispersion of dielectric permittivity and electric conductivity of rocks via two-scale homogenization of the Maxwell equations / V. V. Shelukhin, S. A. Terentev // Progress In Electromagnetics Research, B. – 2009. Vol. 14. – P. 175-202.
23. Weinan E. The Heterogeneous Multiscale Method / E. Weinan, Engquist Bjorn, Li Xiantao, Ren Weiqing, Eric Vanden-Eijnden // Available at: web.math.princeton.edu/multiscale/review.pdf. (accessed 01.12.2016).
24. Даиук П. Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П. Н. Даиук, С. Л. Зайенц, В. С. Комельков; ред. В. С. Комельков. – М. : Атомиздат, 1970. – 472 с.
25. Maksymiuk J. Aparaty elektryczne / J. Maksymiuk. – Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997. – 292 p.
26. Мильх В. И. Электрические контакты для автоматических выключателей и электромагнитных контакторов / В. И. Мильх, Т. П. Павленко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 3 (79). – С. 325-326.
27. Намитоков К. К. Электрорезонансные явления / К. К. Намитоков. – М. : Энергия, 1978. – 456 с.
28. Буткевич Г. В. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Ведешенков, М. А. Жаворонков. – М. : Энергия, 1978. – 256 с.
29. Болюх В. Ф. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії / В. Ф. Болюх, В. Г. Данько. – Харків : Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2006. – 260 с.
30. Райченко А. И. Математическая теория диффузии в приложениях. / А. И. Райченко. – Институт проблем материаловедения Национальной Академии наук Украины. Киев : Наукова думка, 1981. – 396 с.
31. Подольцев А. Д. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 3-15.

#### References (transliterated)

1. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. *Elementy teorii i rascheta elektromagnitnykh processov v provodyashchih sredah*. [The elements of theory and numerical simulation of electromagnetic processes in conducting media]. Kyiv, Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 1999, 363 p.
2. Glebov I. A., Kasharsky E. G., Rutberg F. G. *Sinhronnyie generatory kratkovremennogo i udarnogo deistviya*. [Synchronous generators of short-time and shock operation]. Leningrad, Nauka, 1985, 224 p.
3. Druzhinin A. S., Kuchinsky V. G., Larionov B. A. *Kompressionnye generatory* [Compression generators]. *Physics and techniques of pulsed systems ed.* Eu. P. Velihov. Moscow: Energoatomizdat, 1987, pp. 280-295.
4. Doyle M. R., Samuel D. J., Conway T., and Klimowski R. R. *Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS*. *IEEE Trans. on Magnetics*. 1995, vol. 31, no. 1, pp. 528-533.
5. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Trans. on Magnetics*. 2003, vol. 39, no. 1, pp. 310-313.
6. Milykh V. I. *Issledovaniye impul'snogo rezhima возбужdeniya lineynogo elektrodvigatelya* [Investigation of pulsed mode of excitation for linear electrical motor]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*. 1994, no. 10, pp. 3-9.
7. Zlatin N. A., Krasilshchikov A. P., Mishin G. I., Popov N. N. *Ballisticheskie ustanovki i ih primeneniye v experimental'nykh issledovaniyah*. [Ballistic installations and their application in experimental researches]. Moscow: Nauka, 1974, p. 344.
8. Taiev I. S. (editor). *Teoriya elektricheskikh apparatov* [Theory of electric apparatus]. Moscow: Vysshaya shkola [High School Publ.], 1987: 352. Print.
9. Krishchuk N. G., Vaskovsky Yu. N., Bondar L. N. *Matematicheskoye modelirovaniye elektromagnitnykh poley i dzhoulevykh poter' v rel'sovom uskoritele* [Mathematic simulation of electromagnetic fields and Joule's losses in rail accelerator]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 1994 no. 1, pp. 42-46.
10. Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N. *Kompiuternoye modelirovaniye elektromagnitnykh i teplovykh processov v tehnologicheskikh ustanovkakh s materialah slozhnoy struktury* [Computer simulation of electromagnetic and thermal processes in the technological installations and in materials of complex structure]. *Proc. of Institute of electrodyamics, NAS of Ukraine*. 2005, no. 2(11), part 2, pp. 14-17.
11. Young F. J. and Hughes W. F. Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers. *IEEE Trans. on Magnetics*. 1982, vol. 18, no. 1, pp. 33-41.



12. Thiagarajan V. and Hsieh K. T. A magnetofluid mechanical model to describe rail-armature interface phenomena. *IEEE Trans. on Magnetism*. 2007, vol. 43, no. 1, pp. 198-203.
13. Chemerys V. T. Rail accelerator as continuous commutation process. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2015, vol. 43, no. 3, part II, pp. 869-877.
14. Pavliotis G. A., Stuart A. M. *Multiscale methods: Averaging and Homogenization*. Berlin, Heidelberg, 2007. p. 307.
15. Tartar L. *The general theory of homogenization*. Berlin, Heidelberg, 2009, p. 470.
16. Podoltsev A. D., Kucheryavay I. N. *Mnogomasshtabnoye modelirovaniye v elektrotehnike*. [Multiscale modeling in electrical engineering]. Kyiv, Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 2011, p. 256.
17. Sanchez-Palencia E. *Neodnorodnye sredy i teoriya kolebanij* [Non-homogeneous media and vibration theory]. New York, Springer-Verlag, 1980. 472 p.
18. Bahvalov N. S., Panasenko G. P. *Osredneniye processov v periodicheskikh strukturah. Matematicheskiye zadachi mehaniki kompozitsionnykh materialov* [Averaging of processes in periodic structures. Mathematic problems of mechanics of composite materials]. Moscow, Nauka Publ., PhysMatLit, 1964. 352 p.
19. Bardzokas D. I., Zobnin A. I. *Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh processov v kompozitsionnykh materialah periodicheskoy struktury* [Mathematic simulation of physical processes in composite materials of periodic structure]. Moscow, Editorial URSS, 2003. 376 p.
20. El Feddi M., Ren Z., Razek A., Bossavit A. Homogenization technique for Maxwell equations in periodic structures. *IEEE Trans. on Magnetism*. 1997, vol. 33, no. 2, pp. 1382-1385.
21. Zobnin A. I., Kudryavtsev B. A., Parton V. Z. *Urvneniya Makswella dlya neodnorodnoy sredy s periodicheskoy strukturoy* [Equations of Maxwell for non-uniform medium of periodic structure]. *Izvestiya Akademii Nauk Armyanskoy SSR* [Notes of Armenian Academy of Science]. 1990, vol. 43, no. 1 (Mechanics), pp. 19-26.
22. Shelukhin V. V., Terentev S. A. Frequency dispersion of dielectric permittivity and electric conductivity of rocks via two-scale homogenization of the Maxwell equations. *Progress In Electromagnetics Research*. 2009, vol. 14, pp. 175–202.
23. Weinan E., Bjorn Engquist, Xiantao Li, Weiqing R., VandenEijnden E. *The Heterogeneous Multiscale Method: A Review*. Available at: [web.math.princeton.edu/multiscale/review.pdf](http://web.math.princeton.edu/multiscale/review.pdf). (accessed 01.12.2016).
24. Dashuk P. N., Zajenc S. L., Komel'kov V. S. *Tehnika bol'shykh impulsnykh tokov i magnitnykh polej* [The high currents and magnetic fields techniques]. Moscow : Atomizdat, 1970, : 470 p.
25. Maksymiuk J. *Aparaty elektryczne*. [Electric apparatus]. Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997, 292 p.
26. Milykh V. I., Pavlenko T. P. *Jelektricheskie kontakty dlja avtomaticheskikh vykljuchatelej i jelektromagnitnykh kontaktorov* [Electrical contacts for circuit breakers and electromagnetic contactors]. *Elektrotehnicheskiye i kompiuternye systemy* [Electrotechnical and computer systems]. 2011, vol. 3 (79), pp. 325-26.
27. Namitokov K. K. *Elektroerozionnyye yavleniya* [Electro-erosion phenomena]. Moscow : Energiya, 1978, 456 p.
28. Butkevitch G. V., Belkin G. S., Vedeshenkov N. A., Zhavoronkov M. A. *Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktnov i elektrodov* [Electrical erosion of high-current contacts and electrodes]. Moscow : Energiya, 1978, 256 p.
29. Bolukh V. F., Dan'ko V. G. *Liniy'ni electromehanični peretvoryuvachi impulsnoyi diyi* [Linear electromechanical converters of pulsed operation]. Kharkiv : National technical university "Kharkiv Politechnical Institute", 2006, 260. p.
30. Raychenko A. I. *Matematicheskaya teoriya diffuzii v prilozheniyah*. [Mathematical theory of diffusion in applications]. Institute of material science, National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev : Naukova Dumka Publ., 1981, 396 p.
31. Podoltsev O. D., Kucheriava I. M. *Multifizicheskoye modelirovaniye elektrotehnicheskikh ustroystv* [Multiphysics modeling of electrotechnical devices]. *Tekhnichna Elektrodynamika* [Technical electrodynamics]. 2015, vol. 2, pp. 3-15.

Надійшла (received) 28.03.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Взаємозв'язок між нестационарними фізичними процесами в силових пристроях електромеханіки / В. Т. Чемерис, І. О. Бородій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 42–47. – Библиогр.: 31 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Взаимосвязь между нестационарными физическими процессами в силовых устройствах электромеханики / В. Т. Чемерис, И. А. Бородий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 42–47. – Библиогр.: 31 назв. – ISSN 2409-9295.**

**Interconnection between the unstationary physical processes in the power devices of electromechanics / V. T. Chemerys, I. O. Borodiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 42–47. – Bibliogr.: 31. – ISSN 2409-9295.**

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

**Чемерис Володимир Терентійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний авіаційний університет України, доцент кафедри теоретичної та прикладної фізики; тел.: (044) 406-78-40; e-mail: [vchemer@ukr.net](mailto:vchemer@ukr.net).

**Чемерис Володимир Терентьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный авиационный университет Украины, доцент кафедры теоретической и прикладной физики; тел.: (044) 406-78-40; e-mail: [vchemer@ukr.net](mailto:vchemer@ukr.net).

**Chemerys Volodymyr Terentiyovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Scientist, National Aviation University of Ukraine, Associate Professor at the Department of Theoretical and Applied Physics; tel.: (044) 406-78-40; e-mail: [vchemer@ukr.net](mailto:vchemer@ukr.net).

**Бородій Ірина Олексіївна** – викладач фізики, Національний авіаційний університет України; асистент кафедри теоретичної та прикладної фізики; тел.: (044) 406-78-40; e-mail: [miko2010@ukr.net](mailto:miko2010@ukr.net).

**Бородий Ирина Алексеевна** – преподаватель физики, Национальный авиационный университет Украины, ассистент кафедры теоретической и прикладной физики; тел.: (44) 406-78-40; e-mail: [miko2010@ukr.net](mailto:miko2010@ukr.net).

**Borodiy Iren Oleksiivna** – lecturer of physics, National Aviation University of Ukraine, assistant of professor at Department of Theoretical and Applied Physics; tel.: (044) 406-78-40; e-mail: [miko2010@ukr.net](mailto:miko2010@ukr.net).