

Львівський національний аграрний університет
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛЕВОНЮК ВІТАЛІЙ РОМАНОВИЧ

УДК 621.311:537-77

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ
ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ
НА ОСНОВІ ВАРІАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. Р. Левонюк

Науковий керівник:

Чабан Андрій Васильович,
доктор технічних наук, доцент

Львів – 2019

АНОТАЦІЯ

Левонюк В. Р. Методи та засоби аналізу комутаційних перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги на основі варіаційних підходів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Львівський національний аграрний університет, Львів, 2019. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Робота присвячена розв'язанню задачі покращення методів аналізу перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги за нормальних та аварійних режимів роботи.

У дисертаційній роботі поставлені, сформульовані та вирішені актуальні наукові завдання покращення методів аналізу перехідних процесів у електричних мережах надвисокої напруги за нормальних та аварійних режимів роботи, що дозволить адекватніше відтворювати картину поширення електромагнітних хвиль у лініях електропередач та досліджувати вплив коливних електромеханічних процесів рухомого контакту вимикача на перехідні процеси в елементах електричних мереж.

У першому розділі здійснено аналіз публікацій, які стосуються досліджень перехідних процесів в електротехнічних системах на основі варіаційних підходів. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність застосування варіаційних підходів до дослідження перехідних процесів у згаданих системах. Окрім того, проведено аналіз публікацій у яких досліджуються перехідні комутаційні процеси. Аналіз показав, що вчені віддають перевагу двом підходам до моделювання комутацій: здійснення так званих «миттєвих комутацій» (вимикач у розрахункових схемах імітується активним опором і в момент переходу струму через нульове значення йому присвоюється безмежно велике значення); здійснення комутацій із урахуванням дугових процесів у вимикачах. У більшості праць урахування дугових процесів

здійснюють на основі моделей електричних дуг Кассі та Майра. Таким чином вчені одногласно підтримують імітацію дуги активним опором (провідністю дуги). Проте у працях не враховуються механічні процеси у самих вимикачах під час здійснення комутацій, попри те, що швидкість їх перебігу співмірна із швидкістю протікання перехідних процесів у елементах електричних мереж. Аналіз підходів до розв'язування рівняння довгої лінії для дослідження перехідних процесів у лініях електропередач із розподіленими параметрами показав, що згадане рівняння розв'язують для ідеалізованої лінії (лінії без втрат), або застосовують колівий еквівалент лінії. Таким чином, саме рівняння втрачає свою фізичну сутність, а відтак покращення методів дослідження перехідних процесів у довгих лініях електропередач із розподіленими параметрами є актуальною задачею.

В роботі обґрунтовано застосування варіаційних підходів до моделювання перехідних процесів у електричних мережах надвисокої напруги. Показано, що побудова математичних моделей елементів досліджуваного об'єкту на основі енергетичного підходу, спрощує роботу вузького спеціаліста та не потребує розширення його фаху, а побудова моделі досліджуваного об'єкту зводиться до формування розширеного функціоналу дії за Гамільтоном-Остроградським з подальшою його мінімізацією.

У другому розділі дисертаційної роботи наведено теоретичні засади отримання неконсервативного лагранжіана. Показано, яким чином, виходячи з єдиного енергетичного підходу, що ґрунтується на модифікованому інтегральному варіаційному принципі Гамільтона-Остроградського, можна отримати рівняння руху інерційних мас з податною трансмісією руху, рівняння електричних контурів із зосередженими параметрами та рівняння довгої лінії електропередачі із розподіленими параметрами. Одержання згаданих рівнянь здійснювалося шляхом мінімізації розширеного функціоналу дії за Гамільтоном-Остроградським. Правильність застосування варіаційних підходів до побудови математичних моделей динамічних об'єктів у прикладних задачах

електротехніки, електроенергетики та електромеханіки підтверджується теоретичними положеннями класики механіки та електродинаміки.

Третій розділ присвячений дослідженню некомутаційних перехідних процесів у електричних мережах. Зокрема, тут виходячи з інтердисциплінарного методу математичного моделювання побудовано моделі лінії постійного струму й двох фрагментів електричних мереж змінного струму, ключовим елементом у яких є довга лінія електропередачі із розподіленими параметрами. Під час формування розширеного функціоналу дії за Гамільтоном-Остроградським використано теорію електромагнітного поля та колові підходи. Такий підхід дав можливість за допомогою звичайних диференціальних рівнянь та диференціальних рівнянь з частинними похідними адекватно відтворити фізичні процеси в досліджуваних об'єктах. Запропоновано для розв'язування рівняння довгої лінії використовувати крайові умови другого та третього родів (умови Неймана й Пуанкаре). Розглянуто варіанти пошуку крайових умов для рівняння довгої лінії за наявності вузлових під'єднань до неї. На основі розроблених математичних моделей проаналізовано перехідні процеси в лінії постійного струму для режимів роботи на еквівалентне активно-індуктивне навантаження, короткого замикання та неробочого ходу. Досліджено перехідні процеси для характерних фрагментів електричних мереж.

Правильність застосування запропонованої методики пошуку крайових умов для рівняння довгої лінії, яка ґрунтується на використанні крайових умов другого та третього родів, підтверджено результатами верифікації, які представлені у вигляді часових змін функціональних залежностей напруги та струму в лінії. Результати отримані на основі запропонованої методики порівнювалися із результатами, які отримані у програмних комплексах *MatLab* та *RE*. Верифікація показала, що одержані результати відрізняються менше ніж на 1 %.

Запропонована методика пошуку крайових умов (другого та третього родів) до рівняння довгої лінії дає змогу досліджувати перехідні процеси в елементах електричних мереж не використовуючи при цьому схемний еквівалент самої лінії. Такий підхід дозволяє на польовому рівні врахувати перебіг електромагнітних

процесів та покращити ефективність побудови моделей елементів електричних мереж.

У четвертому розділі для врахування комутаційних процесів у електричних мережах, на основі теорії Лагранжа, розроблено математичну модель вимикача надвисокої напруги. Розроблено математичну модель дезаксіального кривошипно-шатунного механізму переміщення контактів вимикача, яка дозволила враховувати вплив механічних процесів у вимикачі на перехідні процеси в елементах електричних мереж. Також, це дозволяє досліджувати складні комутаційні процеси в елементах електричних мереж, зокрема, враховувати процеси під час розходження контактів, які безпосередньо впливають на швидкість зрізу струму через вимикач, що призводить до виникнення значних перенапруг у електричній мережі. Дугові процеси під час комутацій враховуються нелінійним активно-ємнісним елементом, параметри якого залежать від відстані між контактами вимикача. Використовуючи інтердисциплінарний метод розроблено математичні моделі фрагментів електричних мереж із зосередженими та розподіленими параметрами, в які інтегровано розроблену модель вимикача. На основі розроблених математичних моделей здійснено аналіз перехідних процесів у нормальних та аварійних режимах роботи електричних мереж. Також, інтегрування розробленої математичної моделі вимикача надвисокої напруги в загальну модель електричної мережі дало змогу врахувати його вплив на комутаційні процеси під час аналізу перехідних станів, зокрема, проаналізувати перехідні процеси в мережі під час циклу АПВ з урахуванням зрізу струмів та перенапруг, що виникають під час комутації у вимикачі.

Представлено результати перевірки адекватності математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача, яку було перевірено за допомогою програмного комплексу *COMPAS 3D V13*. Результати верифікації показали, що найбільша відносна похибка становить 5,24 %, за розходження контактів на відстань 0,0061 м, а найменша – 0,14 % на відстань 0,0405 м. Також у роботі співставлено картину перехідних процесів, отриману з допомогою розробленої моделі вимикача та моделі вимикача відомого програмного комплексу *MatLab*, яка ґрунтується на

«миттєвих комутаціях». Отримані результати верифікації підтвердили правильність використаних у роботі допущень під час побудови моделі вимикача.

В дисертаційній роботі розроблено алгоритми та комп'ютерні програми аналізу перехідних процесів у елементах електричних мереж, які дають змогу відтворювати часові, просторові та часово-просторові розподіли функціональних залежностей зміни координат у згаданих об'єктах, що забезпечує достатню адекватність відтворення картини цих процесів. Аналіз перехідних процесів здійснювався за результатами комп'ютерних симуляцій, які представлено у вигляді рисунків. Для високої інформативності теоретичних та практичних доробок представлено низку рисунків у 3D форматі. Матеріали дисертації містять математичні доведення, які ґрунтуються на теоріях диференціального, інтегрального та варіаційного числень. Усі представлені в дисертаційній роботі результати комп'ютерної симуляції були одержані виключно з використанням чисельних методів.

Ключові слова: перехідні процеси, вимикач надвисокої напруги, електрична мережа, надвисока напруга, математична модель, принцип Гамільтона-Остроградського, рівняння Ейлера-Лагранжа, механізм переміщення контактів вимикача, довга лінія.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, та А. Ф. Герман, «Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 3, с. 30 – 35, 2016. (Індексується у *Web of Science*).

[2] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених процесів у лінії електропередачі, що з'єднує ПС «Західноукраїнська» та ПС «Вінницька»», *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи», № 870, с. 97 – 103, 2017.

[3] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, та В. Г. Лисяк, «Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередач як елемента електроенергетичної системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2 (131), с. 63 – 69, 2017.

[4] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters», *Przegląd elektrotechniczny*, № 1, p. 17 – 20, 2018. (Індексується у *Scopus*).

[5] В. Р. Левонюк, «Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, № 20, с. 155 – 161, 2016.

[6] А. Чабан, В. Левонюк, та І. Олексів, «Спрощена математична модель механізму приводу контактів елегазового вимикача», *Технічні вісті*, № 1(45), 2(46), с. 26 – 28, 2017.

[7] В. Левонюк, Г. Чабан, та І. Олексів, «Обґрунтування еквівалентної схеми заміщення елегазового вимикача надвисокої напруги», *Технічні вісті*, № 1(47), 2(48), с. 40 – 42, 2018.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[8] В. Р. Левонюк, «Аналіз числових методів для розв'язання систем диференціальних рівнянь під час дослідження перехідних процесів в електричних колах з R, L, C елементами», *Матеріали XVII міжнародного науково-практичного форуму «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»*, Львів, 2016, с. 261 – 265.

[7] В. Р. Левонюк, «Математичне моделювання неусталених електромагнітних процесів в електроенергетичних системах на основі варіаційних підходів». *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва»*, Кривий-Ріг, 2017, с. 58-59.

[10] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз перехідних електромагнітних процесів в локальній електроенергетичній системі, що складається з чотирьох

трансформаторів, лінії електропередач та еквівалентного активно-індуктивного навантаження», *Тези доповідей XLVI науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького політехнічного інституту*, Вінниця, 2017, с. 2708 – 2709.

[11] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Modelowanie matematyczne procesow nieustalonych w sieciach zasilajacych o parametrach rozlozonych», *Streszczenia XXVII symhpozjuma «Srodowiskowe zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie»*, Mierzecin, 2017, s. 57 – 58.

[12] A. Czaban, A. Szafraniec, M. Lis, V. Levoniuk, H. Lysiak, and R. Figura, «Transient processes anflysis in a part of an power grid during a automatic reclosing cycle», *Proceedings of the 13th International Scientific Conference «Control of Power Systems 2018»*, Tatranské Matliare, 2018, pp. 43 – 48.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

[13] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, № 21, с. 167 – 176, 2017.

[14] A. Czaban, M. Lis, J. Sosnowski, i W. Lewoniuk, «Model matematyczny dwuprzewej linii zasilania z wykorzystaniem modyfikowanej zasady Hamiltona», *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, Nr 1, p. 31 – 36, 2016.

[15] A. Czaban, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Interdyscyplinarne modelowanie procesow nieustalonych w lokalnym ukladzie elektroenergetycznym zawierajacym linie zasilania o parametrach rozlozonych», *Technika transportu szynowego*, № 12, p. 406 – 411, 2016.

[16] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Математична модель трифазної лінії електропередач, що живить еквівалентне активно-індуктивне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(41), 2(42), с. 37 – 39, 2015.

[17] А. Чабан, В. Левонюк, та Р. Столярчук, «Математична модель локальної електроенергетичної системи, що живить активно-індуктивно-ємнісне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(43), 2(44), с. 38 – 42, 2016.

ABSTRACT

Levoniuk V. R. Methods and means of analysis of switching transients processes in ultra high voltage transmission lines on the basis of variational approaches. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis submitted for the degree of a candidate of technical sciences in the speciality 05.14.02 «Electric power stations, networks and systems». – Lviv National Agrarian University, Lviv, 2019. – Vinnitsya National Technical University, Vinnytsia, 2019.

The manuscript is devoted to the problem of improving the methods of analysis of transients processes in power lines of ultra-high voltage under normal and emergency operating modes.

In the thesis, the actual scientific tasks of improving the methods of analysis of transient processes in ultra-high voltage electrical networks under normal and emergency modes of work are formulated and solved, which will allow adequately to reproduce the real picture of the propagation of electromagnetic waves in power transmission lines and to investigate the influence of oscillating electromechanical processes of the moving contact of the circuit breaker on the transients processes in elements of electrical networks.

In the first section, the analysis of publications related to the study of transients processes in electrical systems based on variational approaches. The number of these publications was insignificant, and the analysis confirms the expediency of using variational approaches to the study of transients processes in these systems. In addition, the analysis of publications in which transient switching processes are investigated is carried out. The analysis showed that scientists prefer two approaches to the simulation of switching: the implementation of so-called "instantaneous switching" (circuit breaker in design schemes is simulated by the active resistance and at the time of the current transition through zero value it is assigned an infinitely large value); the implementation of switching

taking into account the arc processes in the circuit breaker. In the majority of works of the accounting of arc processes is carried out on the basis of models of electric arcs of Cassi and Maira. Thus, scientists unanimously support the simulation of the arc with active resistance (arc conductivity). However, the works do not take into account the transient mechanical processes in the circuit breaker themselves in the implementation of switching, despite the fact that the rate of their flow is commensurate with the rate of transients in the elements of electrical networks. Analysis of approaches to solving the equation of the long line for the study of transients processes in power lines with distributed parameters showed that the above equation is solved for an idealized line (line without loss), or apply a circular equivalent line. Thus, the equation itself loses its physical essence, and therefore the improvement of methods for the study of transients processes in long power lines with distributed parameters is an urgent task.

In the tethis application of variational approaches to the simulation of transients in ultra-high voltage networks is substantiated. It is shown that the construction of mathematical models of the elements of the object under study on the basis of the energy approach, simplifies the work of a narrow specialist and does not require the expansion of his specialty, and the construction of the model of the investigated object reduces to the formation of an extended functional action by Hamilton-Ostrogradsky with the subsequent minimization.

In the second section of the dissertation work the theoretical foundations of the nonconservative Lagrangian are given. It is shown how it is possible to obtain equations of motion of inertial masses with a a non-rigid motion transmission, equations of electric circuits with concentrated parameters and equations of a long power line with distributed parameters on the basis of a single energy approach, which is based on the modified Hamilton-Ostrogradsky integral variational principle. The obtaining of the mentioned equations was carried out by minimizing the extended functional action of Hamilton-Ostrogradsky. The correct application of variational approaches to the construction of mathematical models of dynamic objects in applied problems of electrical engineering, electric power engineering and electromechanics is confirmed by the theoretical positions of the classics of mechanics and electrodynamics.

The third section is devoted to the study of non-switching transients processes in electrical networks. In particular, here, based on the interdisciplinary method of mathematical modeling, models of the line of constant current and two fragments of electrical networks of alternating current are constructed, the key element of which is a long transmission line with distributed parameters. The theory of the electromagnetic field and circular approaches are used in the formation of the extended action functional on Hamilton-Ostrogradsky. This approach made it possible using ordinary differential equations and partial differential equations to adequately reproduce the physical processes in the objects under study. It is proposed to use the boundary conditions of the second and third genera (Neumann and Poincare conditions) to solve the long line equation. Variants of search of boundary conditions to the equation of a long line in the presence of nodal connections to it are considered. On the basis of the developed mathematical models, the transient processes in the direct current line for the modes of operation on the equivalent active-inductive load, short circuit and non-working stroke are analyzed. Transient processes in characteristic fragments of electrical networks in short-circuit modes, which were preceded by the output of systems in the steady state, are investigated.

The correct application of the proposed method for finding boundary conditions for a long line equation, based on the use of boundary conditions of the second and third genera, is confirmed by the results of the verification, which are presented in the form of time distributions of the functional dependencies of the voltage and current in the line. The results obtained on the basis of the proposed method were compared with the results obtained in the software complexes MatLab and RE. The verification showed that the results obtained differ by less than 1%.

The proposed method for finding the boundary conditions (second and third genera) to the long line equation enables us to investigate the transients processes in the elements of electrical networks without using the circular equivalent of the line itself. This approach allows to take into account the course of electromagnetic processes at the field level and improve the efficiency of constructing models of elements of electric networks.

In the fourth section to account for the switching processes in electrical networks, based on the theory of Lagrange, the mathematical model of ultra-high voltage circuit breaker. The developed mathematical model of the disaxial crank mechanism for switching contacts of the breaker allows to take into account the influx of electromechanical oscillatory processes in the circuit breaker on the transition processes in the elements of electrical networks. It also allows for the investigation of complex commutation processes in the elements of electrical networks, in particular, to take into account the natural fluctuations of contacts, which directly affect the cross section of the current through the circuit breaker, which leads to overvoltage in electrical network. The arc processes during commutation are taken into account by a nonlinear active-capacitive element whose parameters depend on the distance between the contacts of the circuit breaker. Using the interdisciplinary method, mathematical models of fragments of electrical networks with large and distributed parameters, in which the developed model of the circuit breaker is integrated, are developed. On the basis of developed mathematical models an analysis of transient processes in normal and emergency modes of operation of electric networks was carried out. Also, the integration of the developed mathematical model of the ultra-high voltage switch in the general model of the electric network allowed to take into account complex commutation processes during the analysis of transition states, in particular, to analyze the transient processes in the network during the automatic reclosing cycle, taking into account the cut of currents and overvoltages in the circuit breaker.

The results of checking the adequacy of the mathematical model of the switch mechanism for switching contacts, which was checked with the help of the software complex SOMPAS 3D V13, were presented. The results of the verification showed that the highest relative error is 5.24%, with the difference of contacts at a distance of 0.0061 m, and the smallest - 0.14% with the difference of contacts at a distance of 0.0405 m. Also, the picture is compared to the transient process, obtained with the help of the developed model of the circuit breaker and model switch of the famous software package MatLab, which is based on "instantaneous commutation". The results of the

verification confirmed the correctness of the assumptions used in the work during the construction of the circuit breaker model.

In the dissertation the algorithms and computer programs of the analysis of transients in the elements of electric networks are developed that allow to reproduce time, space and time-space distributions of functional dependences in the mentioned objects, which provides a sufficient visualization of the real picture of these processes. The analysis of transient processes was carried out according to the results of computer simulations, which are presented in the form of drawings. For the high information content of theoretical and practical modifications are presented a number of drawings in 3D format. The materials of the dissertation contain mathematical proofs based on the theories of differential, integral and variational numbers. All computer simulation results presented in the dissertation were obtained solely with the use of numerical methods.

Key words: transients processes, ultra-high voltage circuit breaker, electrical network, ultra-high voltage, mathematical model, principle of Hamilton-Ostrogradsky, equation of Euler-Lagrange, mechanism of the movement of circuit breaker contacts, long line.

LIST OF PUBLICATIONS

Proceedings where basic scientific results of thesis are published:

[1] A.V. Chaban, V. R. Levoniuk, I. M. Drobot, and A.F. Herman, «Mathematical model of electromagnetic processes in Lehera line at open-circuit operation», *Electrical engineering & electromechanics*, № 3, pp. 30 – 35, 2016.

[2] A.V. Chaban, and V. R. Levoniuk, «Analysis of transients in transmission lines that connect substation «Zakhidnoukrayins'ka» and substation «Vinnyts'ka»», *Journal of National University «Lviv Polytechnic», Series: «Electric power and electromechanical systems»*, № 870, pp. 97 – 103, 2017.

[3] A.V. Chaban, V. R. Levoniuk, and V. H. Lysyak, «Analysis of transients in long transmission lines as an element of power system», *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*, № 2 (131), pp. 63 – 69, 2017.

[4] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters», *Przegląd elektrotechniczny*, № 1, p. 17 – 20, 2018.

[5] V. R. Levoniuk, «Comparative analysis of mathematical models of electromagnetic transient processes in elements of power systems», *Bulletin of Lviv National Agricultural University. Agroengineering research*, № 20, pp. 155 – 161, 2016.

[6] A.V. Chaban, V. R. Levoniuk, and I. Oleksiv, «Simplified mathematical model of mechanism for contacts of an insulating circuit breaker», *Technical news*, № 1(45), 2(46), pp. 26 – 28, 2017.

[7] V. Levoniuk, G. Chaban, and I. Oleksiv, «Substantiation of an equivalent circuit for replacing a superheavy element with an insulating circuit breaker», *Technical news*, № 1(47), 2(48), pp. 40 – 42, 2018.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

[8] V. R. Levoniuk, «Analysis of numerical methods for solving differential equations systems during the study of transients in electric circuits with R, L, C elements», *Materials of the XVII International Scientific and Practical Forum «Theory and Practice of the Agro-Industrial Complex and Rural Areas»*, Lviv, 2016, pp. 261 – 265.

[9] V. R. Levoniuk, «Mathematical modeling of unsteady electromagnetic processes in electric power systems on the basis of variational approaches». *Abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists «Topical Issues of Energy Efficiency in Mining and Metallurgical Production»*, Kryviy Rih, 2017, pp. 58-59.

[10] A.V. Chaban, and V. R. Levoniuk, «Analysis of transient electromagnetic processes in a local power system consisting of four transformers, a power line and an equivalent active-inductive load», *Abstracts of the XLVI reports of the scientific and technical conference of the Faculty of Electricity and Electromechanics of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, Vinnytsia, 2017, pp. 2708 – 2709.

[11] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Mathematical modeling of the process is non-linear in terms of the parameters of the rozłożonych», *Abstracts XXVII symposium «Environmental applications of electromagnetism in modern techniques and medicine»*, Mierzecin, 2017, pp. 57 – 58.

[12] A. Czaban, A. Szafraniec, M. Lis, V. Levoniuk, H. Lysiak, and R. Figura, «Transient processes analysis in a part of a power grid during an automatic reclosing cycle», *Proceedings of the 13th International Scientific Conference «Control of Power Systems 2018»*, Tatranské Matliare, 2018, pp. 43 – 48.

Proceedings, which additionally reflect the scientific results of the thesis:

[13] A.V. Chaban, and V. R. Levoniuk, «Analysis of transient electromagnetic processes in the fragment of the electric power system on the basis of classical approaches to modeling», *Bulletin of Lviv National Agricultural University. Agroengineering research*, № 21, pp. 167 – 176, 2017.

[14] A. Czaban, M. Lis, J. Sosnowski, and V. Lewoniuk, «Mathematical model of a two-line power line using the modified Hamilton principle», *Electric Machines - Notebooks Problems*, Nr 1, pp. 31 – 36, 2016.

[15] A. Czaban, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Interdisciplinary modeling of transient processes in the local system one with an electricity power lines with distributed parameters», *Rail transport technology*, № 12, pp. 406 – 411, 2016.

[16] A.V. Chaban, and V. R. Levoniuk, «The mathematical model of the three-phase power line supplying the equivalent active-inductive load», *Technical news*, № 1(41), 2(42), pp. 37 – 39, 2015.

[17] A.V. Chaban, V. R. Levoniuk, and R. Stolyarchuk, «Mathematical model of the local power system, which feeds the active-inductive-capacitive load», *Technical news*, № 1(43), 2(44), pp. 38 – 42, 2016.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	26
1.1 Аналіз перехідних процесів у системах із зосередженими та розподіленими параметрами на основі міждисциплінарних підходів до моделювання.....	26
1.2 Аналіз комутаційних процесів у електричних мережах.....	29
1.3 Аналіз перехідних процесів у лініях електропередач із розподіленими параметрами.....	39
1.4 Висновки до першого розділу.....	44
РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО ПРИНЦИПУ ГАМІЛЬТОНА-ОСТРОГРАДСЬКОГО ДО ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	45
2.1 Теоретичні засади одержання неконсервативного лагранжіана....	46
2.2 Рівняння руху інерційних мас із податною трансмісією руху.....	49
2.3 Рівняння електричних контурів із зосередженими параметрами...	53
2.4 Рівняння лінії електропередачі з розподіленими параметрами.....	56
2.5 Висновки до другого розділу.....	63
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ БЕЗ УРАХУВАННЯ КОМУТАЦІЇ.....	64
3.1 Моделювання та аналіз перехідних процесів у лініях електропередач постійного струму.....	66
3.1.1 Режим неробочого ходу.....	69
3.1.2 Режим активно-індуктивного навантаження.....	75
3.1.3 Режим короткого замикання.....	79
3.2 Моделювання та аналіз перехідних процесів у фрагменті електричної мережі з лінією надвисокої напруги.....	86

3.3	Моделювання та аналіз перехідних процесів у багатовузловій електричній мережі з лінією надвисокої напруги.....	95
3.4	Верифікація методики формування крайових умов до рівняння довгої лінії з розподіленими параметрами.....	105
3.5	Висновки до третього розділу.....	107
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ.....		109
4.1	Математична модель елегазового вимикача надвисокої напруги..	110
4.1.1	Модель дезаксіального кривошипно-шатунного механізму переміщення контактів.....	111
4.1.2	Еквівалентна електрична схема заміщення вимикача.....	117
4.1.3	Спрощена механічна схема вимикача	122
4.2	Аналіз комутаційних процесів під час вимкнення струмів коротких замикань.....	123
4.3	Аналіз комутаційних процесів у циклі АПВ лінії з розподіленими параметрами.....	133
4.4	Верифікація моделі вимикача.....	141
4.5	Висновки до четвертого розділу.....	144
ВИСНОВКИ.....		146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		148
ДОДАТКИ.....		164
ДОДАТОК А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....		165
ДОДАТОК Б Програмний код реалізації математичної моделі лінії постійного струму, яка працює в режимі роботи на навантаження та режимі КЗ, написаний алгоритмічною мовою <i>Visual Fortran</i>		168
ДОДАТОК В Формування рівнянь електромагнітного стану фрагмента електричної мережі з лінією електропередачі надвисокої напруги.....		171
ДОДАТОК Г Програмний код реалізації математичної моделі фрагменту електричної мережі надвисокої напруги написаний алгоритмічною мовою <i>Visual Fortran</i>		177

ДОДАТОК Д Отримання рівнянь електромагнітного стану для багато-вузлової електричної мережі надвисокої напруги.....	181
ДОДАТОК Е Процедура отримання функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ та її апроксимації....	186
ДОДАТОК Ж Отримання рівнянь електромагнітного та електромеханічного стану фрагмента електричної мережі для аналізу комутаційних процесів під час вимкнення струмів коротких замикань.....	187
ДОДАТОК З Програмний код реалізації математичної моделі фрагмента електричної мережі для аналізу комутаційних процесів під час вимкнення струмів коротких замикань написаний алгоритмічною мовою <i>Visual Fortran</i>	193
ДОДАТОК К Формування рівнянь електромагнітного та механічного стану для аналізу комутаційних процесів у циклі АПВ лінії з розподіленими параметрами.....	199
ДОДАТОК Л Процедура знаходження напруг у фіктивних дискретних вузлах моделі лінії з розподіленими параметрами для задачі аналізу комутаційних процесів у циклі АПВ.....	204
ДОДАТОК М Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	206

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Одним з найважливіших стратегічних об'єктів будь-якої держави є електричні мережі, основним призначення яких є об'єднання між собою джерел електроенергії (електричних станцій) та споживачів у єдину електроенергетичну систему [1]. Якщо теорія аналізу усталених процесів у згаданих мережах розроблена практично досконало [1] – [4], то щодо теорії перехідних процесів є певні запитання, особливо коли це стосується ліній електропередач високої та надвисокої напруг. Зазвичай перехідні процеси в електричних мережах виникають під час пошкодження їх елементів або внаслідок комутації вимикачів [5], [6]. Відомо, що під час реальних комутацій розрив струму відбувається не обов'язково в момент проходження останнього через нуль [7] – [9], що породжує надскладну проблему пошуку цих струмів. Для її вирішення запропоновано модель вимикача надвисокої напруги, основний акцент у якій зроблено на динаміку дезаксіального механізму переміщення контактів. З точки зору фізики в згаданому пристрої (вимикачі) відбуваються надскладні процеси, для опису яких потрібно задіяти досить об'ємний апарат прикладної фізики, зокрема, рівняння електромагнітного поля, рівняння Фур'є, теорію плазми з урахуванням впливу середовища (його фізико-хімічних властивостей), а також теорію Лагранжа щодо механіки руху контактів. На нинішній день моделі згаданих пристроїв якщо й побудовані [10], то є досить складними й громіздкими, а відтак, не завжди прийнятні в задачах аналізу перехідних процесів у електричних мережах. Таким чином, побудова математичних моделей комутаційних пристроїв помірної складності, що на достатньому рівні описують згадану вище проблему, зокрема вимикачів надвисокої напруги, – на часі.

Для реальних ліній електропередач як основних елементів електричних мереж напруги на початку й кінці лінії є невідомими функціями. Це породжує проблему пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії, оскільки для їх знаходження необхідно залучати математичну модель цілої підсистеми (як на

початку, так і кінці лінії), що в об'ємних підсистемах достатньо проблематично. Тому пошуку крайових умов до рівняння лінії в роботі також приділено увагу.

У роботі аналізуються перехідні процеси в динамічних системах, що складаються з електромагнітних та механічних підсистем. Відтак, це дає підстави згідно з теорією Увайта-Вудсона [11] для використання варіаційних підходів. За основу побудови моделей згаданих систем взято модифікований принцип Гамільтона-Остроградського [12].

У дисертації досліджуються мережі постійного й змінного струмів. Для мереж змінного струму досліджувалися лише симетричні режими, що дозволило представити трифазну симетричну електричну мережу в однолінійному виконанні з параметрами її елементів для прямої послідовності. Усі математичні моделі реалізовано виключно з використанням чисельних методів шляхом побудови алгоритмів з подальшою реалізацією за допомогою алгоритмічної мови *Visual Fortran*.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є розвиток методів аналізу перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги на основі варіаційних підходів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі.

1. Застосувати апарат варіаційного числення до побудови математичних моделей елементів електричних мереж надвисокої напруги.
2. Розробити методіку пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії електропередач як елемента електричної мережі, використовуючи крайові умови другого та третього родів до диференціального рівняння лінії.
3. Розробити єдиний енергетичний підхід до побудови моделі елегазового вимикача, що враховує електричні та механічні процеси.
4. На основі розробленої моделі вимикача проаналізувати коливні електро-механічні процеси в механізмі переміщення контактів.
5. Проаналізувати необхідність врахування впливу механічних коливних процесів у елегазовому вимикачі на перехідні процеси в елементах електричних мереж.

6. Розробити алгоритмічно-програмний засіб реалізації створених математичних моделей.

7. Порівняти результати комп'ютерної симуляції розроблених математичних моделей з відомими прикладними програмами.

Об'єктом досліджень є перехідні процеси в електричних мережах надвисокої напруги.

Предметом дослідження є моделі елементів електричних мереж, створені на основі модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали: метод математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації принципу Гамільтона-Остроградського, використаний для побудови математичних моделей; методи дискретизації диференціальних рівнянь з частинними похідними, які використовувалися для дискретизації рівняння довгої лінії за просторовою координатою; чисельні методи інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь, що описують електромагнітний та електромеханічний стани досліджуваних об'єктів за явним і неявним принципами; методи алгоритмізації досліджуваних задач, які використовувалися для побудови алгоритмів, блок-схем та комп'ютерних програм на відповідних алгоритмічних мовах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримано подальший розвиток теорії моделювання електротехнічних систем шляхом застосування модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського для задач аналізу перехідних процесів, що дало змогу будувати моделі елементів електричних мереж надвисокої напруги виходячи з єдиного енергетичного підходу.

2. Удосконалено метод пошуку крайових умов до рівняння довгої лінії надвисокої напруги як елемента електричної мережі шляхом використання крайових умов другого та третього родів, що дало змогу аналізувати електромагнітні перехідні процеси, зокрема, підвищити адекватність відтворення картини поширення електромагнітної хвилі в лінії електропередачі.

3. Уперше побудовано математичну модель елегазового вимикача як елемента електричної мережі надвисокої напруги, у якій на противагу до відомих враховано динаміку руху дезаксіального механізму переміщення контактів, а дугові процеси між контактами зеквівалентовано нелінійним активним опором та ємністю, що дало змогу досліджувати вплив коливних електромеханічних процесів рухомого контакту на перехідні процеси в елементах електричних мереж.

Практичне значення отриманих результатів:

– урахування впливу електромеханічних коливних процесів у елегазовому вимикачі на електромагнітні процеси в електричних мережах дало змогу уточнити перебіг перехідних процесів у них, відтак скорегувати часовий інтервал для подачі команди на вимкнення вимикача;

– розроблена математична модель вимикача, у якій основну увагу приділено динаміці руху дезаксіального механізму переміщення контактів, є придатною до використання під час аналізу причин зношування вимикачів;

– створені на підґрунті розроблених математичних моделей програмні засоби придатні до використання як автономні продукти на етапах проектування та експлуатації електричних мереж.

Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі Львівського національного аграрного університету для підвищення якості лекційних та лабораторних занять з курсів «Математичне моделювання електротехнічних систем» і «Проектування систем електропостачання» та на ПС 750 кВ «Західноукраїнська» з метою розширення можливостей аналізу електромагнітних процесів, які зумовлені комутацією вимикачів надвисокої напруги. Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів (Додаток А).

Результати досліджень, що викладені у [13] – [29], були отримані у Львівському національному аграрному університеті.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які наведено у дисертації, отримані здобувачем самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, безпосередньо дисертанту належить: [13] – пошук крайових умов

до рівняння довгої лінії в режимі неробочого ходу; [14] – побудова математичної моделі фрагмента електричної мережі; [15] – одержання рівнянь електромагнітного стану електричної мережі на основі модифікованого принципу Гамільтона-Остроградського; [16] – пошук крайових умов до рівняння довгої лінії за умови багатовузлових під'єднань до неї; [18] – побудова математичної моделі фрагменту електричної мережі на основі класичних підходів до моделювання; [19] – побудова математичної моделі лінії постійного струму та аналіз перехідних процесів у режимі короткого замикання; [20] – аналіз часових, просторових та часово-просторових розподілів функціональних залежностей напруг та струмів у лінії; [21] – аналіз останніх досліджень та публікацій; [22] – порівняльний аналіз перехідних процесів за різних заступних схем лінії електропередачі; [23] – побудова спрощеної математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача; [24] – обґрунтування правомірності еквівалентності заступної схеми вимикача надвисокої напруги; [27] – побудова розширеного лагранжіану для динамічної системи; [28] – здійснення аналізу перехідних процесів під час виходу системи в усталений режим; [29] – побудова математичної моделі дезаксіального механізму переміщення контактів вимикача та аналіз перехідних процесів у електричній мережі в циклі АПВ.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати дисертаційних досліджень були предметом обговорень на:

– засіданні кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства Національного університету «Львівська політехніка» (2016 р);

– науковому семінарі кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету «Львівська політехніка (2017 р);

– науковому семінарі кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» (2018 р).

– XVII міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій (2016)», Львів – Дубляни, 14 – 16 вересня 2016 р;

– Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва (2017)», м. Кривий-Ріг, 20 – 22 березня 2017 р.;

– XLVI науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького політехнічного інституту (2017), м. Вінниця, 22 – 24 березня 2017 р.;

– XXVII symposium «Srodowiskowe zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie (2017)», Mierzecin, 18-21 czerwca 2017 r;

– міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 10-річчю кафедри електротехнічних систем «Розвиток енергетичних систем в агропромисловому комплексі (2017)», м. Львів, 20 – 22 вересня 2017 р.;

– 13th International Scientific Conference POWER ENGINEERING 2018 (ENERGETIKA 2018). Control of Power Systems 2018. Tatranské Matliare - Tatranská Lomnica, 5-7 June 2018.

Публікації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи викладені в 17 наукових працях, в тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних *Web of Science*, 3 статті – у закордонних періодичних виданнях, в тому числі 1 стаття – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних *Scopus*, 4 статті – у наукових журналах і збірниках наукових праць, 5 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, бібліографічного списку використаних джерел і 11 додатків. Загальний обсяг роботи становить 209 сторінок друкованого тексту, з них: 6 сторінок вступу, 128 сторінки основного тексту, 119 рисунків, 1 таблиця, список використаних джерел із 152 найменувань, 11 додатків на 44 сторінках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. Н. Денисенко, и В. С. Перхач. *Электрические системы и сети*. Киев, СССР: Вища школа, 1986.
- [2] В. И. Идельчик, *Электрические системы и сети*. Москва, СССР: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, та Т. А. Мазур, *Математичне моделювання в електроенергетиці*. Львів, Україна: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010.
- [4] В. В. Ершевич, А. Н. Зейлингер, и Г. А. Илларионов, *Справочник по проектированию электроэнергетических систем*. Москва, СССР: Энергоатомиздат, 1985.
- [5] І. Ю. Тугай, та В. А. Мельничук, «Ферорезонансні процеси на підстанціях з елегазовими вимикачами та електромагнітними трансформаторами напруги», *Праці ІЕД НАНУ*, Вип. 44, с. 21 – 26, 2016.
- [6] Ю. И. Вишнеvский, *Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией*. Санкт-Петербург, Россия: Энергоатомиздат, 2002.
- [7] В. Е. Качесов, и Д. В. Качесов, «О негативном влиянии апериодической составляющей тока на отключение линейных выключателей», *Электричество*, № 9, с. 32 – 38, 2012.
- [8] И. А. Андреев, Д. А. Козлов, Н. А. Кармушко, и А. А. Мартиросян, «Расчет переходных режимов для определения апериодической составляющей токов в моменты коммутации выключателями присоединений». *Восьмая международная научно-техническая конференция молодых ученых «Энергия – 2013»*, Иваново, 2013, с. 34 – 40.
- [9] А. А. Базавлук, и К. П. Кадомская, «Математическое моделирование и анализ процессов, сопровождающих коммутации в электропередачах высокого напряжения, оснащенных шунтирующими реакторами», *Сборник научных трудов НГТУ*, № 2(56), с. 121 – 128, 2009.

[10] A. Ahmethodžić, M. Kapetanović, and Z. Gajić, «Computer Simulation of High-voltage SF6 Circuit Breakers: Approach to Modeling and Application Results», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No. 4, p. 1314 – 1322, 2011.

[11] Д. Уайт, и Г. Вудсон, *Электромеханическое преобразование энергии*. Москва, СССР: Энергия, 1964.

[12] А. В. Чабан, *Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах*. Львів, Україна: В-во Тараса Сороки, 2015.

[13] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, та А. Ф. Герман, «Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 3, с. 30 – 35, 2016.

[14] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених процесів у лінії електропередачі, що з'єднує ПС «Західноукраїнська» та ПС «Вінницька»», *Вісник національного університету «Львівська політехніка», Серія: “Електроенергетичні та електромеханічні системи»*, № 870, с. 97 – 103, 2017.

[15] А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, та В. Г. Лисяк, «Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередач як елемента електроенергетичної системи», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2 (131), с. 63 – 69, 2017.

[16] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, and V. Levoniuk, «Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters», *Przegląd elektrotechniczny*, № 1, p. 17 – 20, 2018.

[17] В. Р. Левонюк, «Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. № 20, с. 155 – 161, 2016.

[18] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання», *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*, № 21, с. 167 – 176, 2017.

[19] A. Czaban, M. Lis, J. Sosnowski, i W. Lewoniuk, «Model matematyczny dwuprzewowej linii zasilania z wykorzystaniem modyfikowanej zasady Hamiltona», *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, Nr 1, p. 31 – 36, 2016.

[20] A. Czaban, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Interdyscyplinarne modelowanie procesow nieustalonych w lokalnym układzie elektroenergetycznym zawierającym linie zasilania o parametrach rozłożonych», *Technika transportu szynowego*, № 12, p. 406 – 411, 2016.

[21] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Математична модель трифазної лінії електропередач, що живить еквівалентне активно-індуктивне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(41), 2(42), с. 37 – 39, 2015.

[22] А. Чабан, В. Левонюк, та Р. Столярчук, «Математична модель локальної електроенергетичної системи, що живить активно-індуктивно-ємнісне навантаження», *Технічні вісті*, № 1(43), 2(44), с. 38 – 42, 2016.

[23] А. Чабан, В. Левонюк, та І. Олексів, «Спрощена математична модель механізму приводу контактів елегазового вимикача», *Технічні вісті*, № 1, с. 26 – 28, 2017.

[24] В. Левонюк, Г. Чабан, та І. Олексів, «Обґрунтування еквівалентної схеми заміщення елегазового вимикача надвисокої напруги», *Технічні вісті*, № 1(47), 2(48), с. 40 – 42, 2018.

[25] В. Р. Левонюк, «Аналіз числових методів для розв'язання систем диференціальних рівнянь під час дослідження перехідних процесів в електричних колах з R, L, C елементами», *Матеріали XVII міжнародного науково-практичного форуму «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій»*, Львів, 2016, с. 261 – 265.

[26] В. Р. Левонюк, «Математичне моделювання неусталених електромагнітних процесів в електроенергетичних системах на основі варіаційних підходів». *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених «Актуальні питання енергоефективності гірничо-металургійного виробництва»*, Кривий-Ріг, 2017, с. 58-59.

[27] А. В. Чабан, та В. Р. Левонюк, «Аналіз перехідних електромагнітних процесів в локальній електроенергетичній системі, що складається з чотирьох

трансформаторів, лінії електропередач та еквівалентного активно-індуктивного навантаження», *Тези доповідей XLVI науково-технічної конференції факультету електроенергетики та електромеханіки Вінницького політехнічного інституту*, Вінниця, 2017, с. 2708 – 2709.

[28] A. Czaban, M. Lis, M. Chrzan, A. Szafraniec, i V. Levoniuk, «Modelowanie matematyczne procesow niustalonych w sieciach zasilajacych o parametrach rozlozonych», *Streszczenia XXVII sympozjuma «Srodowiskowe zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i medycynie»*, Mierzecin, 2017, s. 57 – 58.

[29] A. Czaban, A. Szafraniec, M. Lis, V. Levoniuk, H. Lysiak, and R. Figura, «Transient processes anflysis in a part of an power grid during a automatic reclosing cycle», *Proceedings of the 13th International Scientific Conference «Control of Power Systems 2018»*, Tatranské Matliare, 2018, pp. 43 – 48.

[30] В. Є. Бахрушин, *Математичне моделювання*. Запоріжжя, Україна: ГУ «ЗІДМУ», 2004.

[31] А. Чабан, «Математичне моделювання електромеханічних коливних процесів у системах із зосередженими та розподіленими параметрами», дис. д-ра наук., Нац. ун-т, «Львівська політехніка», Львів, 2009.

[32] С. Костючко, та В. Чабан, *Параметрична чутливість нелінійних систем*. Львів, Україна: Простір М, 2018.

[33] В. Чабан, *Електромагнетні процеси*. Львів, Україна: Простір М, 2017.

[34] М. Планк, *Избранные труды*. Москва, СССР: Наука, 1975.

[35] Ю. П. Емец, *Краевые задачи электродинамики анизотропно проводящих сред*. Киев, СССР: Наукова думка, 1987.

[36] А. И. Лазебник, Е. С. Левитин, и И. Л. Хранович, «О вариационных принципах электрических цепей». *Теоретическая электротехника*, Выпуск 18, с. 7 – 9, 1975.

[37] П. Д. Лежнюк, та В. В. Нетребський, «Математичне моделювання оптимальних станів електроенергетичних систем на засадах принципу найменшої дії»,

Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Електромеханічні та електроенергетичні системи», № 596, с. 73 – 78, 2007.

[38] А. Н. Милях, и А. К Шидловский, *Принцип взаимности и обратимости явлений в электротехнике*. Киев, СССР: Наукова думка, 1967.

[39] И. В. Пентегов, «Лагранжиан электрической цепи с сосредоточенными параметрами и его применение», *Электричество*, № 5, с. 59 – 63, 1969.

[40] Л. В. Сафрис, и В. Ф. Попова, «Принцип наименьшего действия в теории электрических цепей», *Теоретическая электротехника*, Выпуск 10, с. 103 – 105, 1970.

[41] Л. А. Синицкий, *Методы аналитической механики в теории электрических цепей*. Львов, СССР: Вища школа, 1978.

[42] A. Loria, and H. Nijmeijer, «Bounded output feedback tracking control of fully actuated Euler-Lagrange systems», *Systems and Control Letters*, Volume 33, Number 3, p. 151 – 161, 1998.

[43] R. Ortega, A. Loria, P. Nicklasson, and H. Sira-Ramirez, *Passivity-Based Control of Euler-Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*, London, England: Springer Verlag, 1998.

[44] С. Безверхий, В. Нагул, та Г. Шобаш, «Принцип найменшої дії: історична довідка та деякі застосування в електротехніці та електромеханіці», *Проблемы создания новых машин и технологий (Научные труды Кременчугского политехн. ин-та)*. №1, с. 272 – 276, 2000.

[45] С. И. Хмельник, *Вариационный принцип экстремума в электромеханических системах*. Израиль-Россия, 2005.

[46] Я. Й. Буряк, та Г. І. Мороз, «Про два варіанти варіаційного формулювання крайових задач нелінійної механіки пружних систем», *Математичні методи та фізико-механічні поля*, № 3, с. 78 – 87, 2004.

[47] А. А. Самарский, и А. П. Михайлов, *Математическое моделирование*. Москва, Россия: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

[48] G. Besancon, S. Battilotti, and L. Lanari, «A new separation result for a class of quadratic-like systems with application to Euler-Lagrange models». *Automatica*, Vol 39, p. 1085 – 1094, 2003.

[49] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, та В. В. Тептя, *Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014.

[50] Е. Н. Иванов, А. В. Черничкова, и М. Б. Шамсиева, «Способ расчета электрических цепей на основе квадратичного программирования», *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*, № 4 (16), с. 67 – 71, 2012.

[51] D. Mayer, «Hamilton's principle and electric circuits theory», *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, p. 185 – 189, 2006.

[52] В. В. Сахаров, А. А. Чертков, и С. В. Сабуров, «Моделирование стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях средствами нелинейного программирования», *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*, №3(31), с. 156 – 164, 2015.

[53] П. Д. Лежнюк та ін., «Використання принципу найменшої дії для вдосконалення керування нормальними режимами ЕЕС», *Наукові праці ДонНТУ, «Електротехніка і енергетика»*, № 1(14), с. 159 – 162, 2013.

[54] В. Чабан, та А. Чабан, «Варіаційний принцип в електротехніці», *Технічні вісті*, № 1(22), с. 94 – 97, 2006.

[55] M. Lis, «Modelowanie matematyczne procesów nieustalonych w wielomaszynowym układzie napędowym o złożonej transmisji ruchu», *Przegląd elektrotechniczny*, № 6, с. 253 – 256, 2014.

[56] І. А. Курило, В. П. Грудська, Л. Ю. Спінул, та М. А. Щерба, *Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах*. Київ, Україна: НТУУ «КПШ», 2013.

[57] И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, и М. В. Пиратов, *Переходные процессы в электроэнергетических системах*. Москва, Россия: Издательский дом МЭИ, 2008.

[58] К. Рагаллер, *Отключение токов в сетях высокого напряжения*. Москва, СССР: Энергоиздат, 1981.

[59] А. С. Ильин, «Математическое моделирование термодинамических процессов гашения дуги в потоке элегаза (SF_6) в электрических аппаратах», автореф. дис. канд. наук., Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 2012.

[60] A. M Cassie, «A New Theory of Arc Rupture and Circuit Severity», *CIGRE*, Paper № 102, p.1 – 14, 1939.

[61] O. Mayr, «Beitriige zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens», *Archiv fur Elektrotechnik*, N 37, Heft 12, s. 588 – 608, 1943.

[62] М. Е. Заруди, «О явлении нелинейных свойств плазмы на характер нестационарных процессов в стволе каналовой дуги (вопросы теории и расчета)», *Журнал технической физики*, № 4, с. 734 – 743, 1971.

[63] О. Я. Новиков, *Устойчивость электрической дуги*. Ленинград, СССР: Энергия, 1978.

[64] М. Шельгазе, «Математическая модель переходных процессов в сварочной дуге и ее использование», *Автоматическая сварка*, № 7, с. 13 – 16, 1971.

[65] В. Н. Сидорец, и И. В. Пантегов, *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Украина: Международная ассоциация «Сварка», 2013.

[66] N. S. Mahajan, K. R. Patil, and S. M. Shembekar, «Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK», *International journal of science, spirituality, business and technology*, Vol. 1, No.2, p. 15 – 21, 2013.

[67] W.1.0, and SC 13, «State of art of circuit-breaker modeling», *Cigre*, N°135, 1998.

[68] S. Pasumpon, R. Saravanan, A. Maruthu, A. Saravanan, and M. Muneeswaran, «Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model», *International Journal of Digital Communication and Networks*, Volume 3, Issue 2, p. 18 – 23, 2016.

[69] Pankaj R. Gajare, Ajit P. Chaudhari, and Girish K. Mahajan, «Analysis and Modilization of Electric Arc Model for High Voltage Circuit Breaker Based on Matlab/Simulink», *Resincap Journal of Science & Engineering*, Volume 1, Issue 8, p. 202 – 207, 2017.

[70] P. H. Schavemaker, and Van der Sluis L, «An Improved Mayr Type Arc Model Based on Current Zero Measurements», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No 2, p. 580 – 584, 2000.

[71] L. van der Sluis, W. R. Rutgers, and C. G. A. Koreman, «A physical arc model for the simulation of current zero behavior of high-voltage circuit breakers», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 7, Issue 2, p. 1016 – 1022, 1992.

[72] Božidar Filipovic-Grcic, Ivo Uglešić, and Dalibor Filipovic-Grcic, «Analysis of Transient Recovery Voltage in 400 kV SF₆ Circuit Breaker Due to Transmission Line Faults», *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 6, N. 5, p. 2652 – 2658, 2011.

[73] Ivo Uglešić, Sandra Hutter, Miroslav Krepela, Božidar Filipović- Grčić, and Franc Jakl, «Transients Due to Switching of 400 kV Shunt Reactor», *International Power Systems Transients Conference*, Rio de Janeiro, 2001.

[74] I. Naumkin, M. Balabin, N. Lavrushenko, and R. Naumkin, «Simulation of the 500 kV SF₆ circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing», *Proceedings of International Conference on power systems Transients*, Kyoto, 2011, p. 5–11.

[75] R. Thomas, D. Lahaye, C. Vuik, and L. van der Sluis, «Simulation of Arc Models with the Block Modelling Method», *International Conference on Power Systems Transients*, Cavtat, 2015. [Электронный ресурс]. http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2015/15IPST029.pdf.

[76] P. Oramus, T. Chmielewski, T Kuczek, W. Piasecki, and M Szewczyk, «Transient recovery voltage analysis for various current breaking mathematical models: shunt reactor and capacitor bank de-energization study», *Archives of electrical engineering*, Vol. 64(3), p. 441 – 458, 2015.

[77] U. Habedank, «Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests», *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, p. 1921-1925, 1993.

[78] Lionel R. Orama-Exclusa, and Bienvenido Rodríguez-Medina, «Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF₆ Circuit Breaker Simulations», *International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, 2003, с. 1 – 5.

[79] P. Z. Grega Bizjak, and Dusan Povh, «Circuit Breaker Model For Digital Simulation Based On Mayr's And Cassie's Differential Arc Equations», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, p. 1310 – 1315 1995.

[80] Amir Hayati Soloot, Ahmad Gholami, and Kaveh Niayesh, «Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker», *International Review of Modeling and Simulations*, Vol. 4, N. 2, p. 699 – 709, 2010.

[81] Li-qun Shang, «Arcing Fault Detection in Distribution Lines», *International Journal of Computer, Consumer and Control*, Vol. 3, No.1, p. 1 – 11, 2014.

[82] A. Zupan, «Transients caused by switching of 420 kV three-phase variable shunt reactor», *Electr. Power Syst. Res*, p. 1 – 8, 2015.

[83] Р. И. Беличенко, «Моделирование дуговых коротких замыканий в электрических сетях», *Международный научно-исследовательский журнал*, № 12 (54), с. 6 – 10, 2016.

[84]. Г. А. Сисоян, *Электрическая дуга в электрической печи*. Москва, СССР: Металлургия, 1974.

[85] А. М. Залесский, *Электрическая дуга отключения*. Москва, СССР: Государственное Энергетическое Издательство, 1963.

[86] А. С. Ильин, «Определение максимальной коммутационной способности элегазового выключателя высокого напряжения с помощью численного моделирования процессов дугогашения», *Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность»*, Томск, 2011, с. 31 – 33.

[87] Mustafa Kizilcaу, «Switching overvoltages in a 400-kV cable system», *16th PSCC*, Glasgow, 2008, p. 1 – 6.

[88] Ю. А. Лавров, А. Г. Овсянников, С. С. Шевченко, и О. Ю. Шиллер, «Перенапряжения при коммутациях блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем», *Электро*, № 6, с. 24 – 27, 2010.

[89] М. С. Волков, «Разработка рекомендаций по обеспечению отключающей способности выключателей в электрических сетях 110 – 220 кВ с токоограничивающими реакторами», автореф. дис. канд. наук., Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 2013.

[90] *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. [Электронный ресурс]. <http://een.iust.ac.ir/profs/Shahrtash/2014/Electrical%20Power%20System%20Transients/EMTP%20Theory%20Book.pdf>. (дата звернения 17.06.2018р).

[91] Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, и И. В. Пенетгов, *Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки*. Николаев, Украина: УГМТУ, 2000.

[92] Е. Н. Верещаго, и В. И. Костюченко, «Модель электрической дуги в Matlab/Simulink», *Электротехника та електроенергетика*, № 2, с. 51 – 54, 2013.

[93] S. Vojić, I. Uglešić, and B. Filipović-Grčić, «Switching Transients in 400 kV Transmission Network due to Circuit Breaker Failure», *International Conference on Power Systems Transients*, Vancouver, 2013. [Электронный ресурс]. Доступно http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2013/13IPST141.pdf.

[94] Омокеева А. А. Особенности моделирования генераторных выключателей при исследовании коммутационных процессов. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования». НИ ТПУ, 2012. С. 76 – 78.

[95] G. Ala, P. Buccheri, and M. Inzerillo, «A model to simulate EM switching transients in electric power distribution substations», *Proceedings of 15th International Conference on Electricity Distribution CIRED-99*, 1999. [Электронный ресурс]. https://www.researchgate.net/profile/Guido_Ala/publication/236213034_A_model_to_simulate_EM_switching_transients_in_electric_power_distribution_substations/links/0deec51a1e0e75b06f000000/A-model-to-simulate-EM-switching-transients-in-electric-power-distribution-substations.pdf.

[96] Dan Goldsworthy, Tom Roseburg, Demetrios Tziouvaras, and Jeff Pope, «Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits». *Previously presented at the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2008, p. 1 – 16.

[97] Ю. П. Гусев, и А. А. Омокеева, «Исследование электромагнитных переходных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС», *Наука и образование*, №12, с. 557 – 570, 2012.

[98] А. А. Омокеева, «Коммутационные переходные процессы в цепях генераторного напряжения малых ГЭС», *Известия КГТУ им. И.Раззакова*, № 29, с. 37 – 41, 2013.

[99] Г. А. Евдокунин, М. В. Дмитриев, С. Г. Гольдштейн, и Ю. М. Иваницкий, «Коммутации воздушных линий высокого напряжения и воздействия на выключатели», *Новости Электротехники*, № 3(51), с. 1 – 13, 2008.

[100] Yotaka Chompusri, Srawut Kleesuwan, Noppadol Charbkaew, and Teratam Bunyagul, «High Voltage SF6 Circuit Breaker Modeling for Capacitor Bank Controlled Switching Simulation». *International Conference Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology*, Chiang Mai, 2010.

[101] Ivo Uglesic, Sandra Hutter, Viktor Milardic, Igor Ivankovic, and Bozidar Filipovic-Grcic, «Electromagnetic Disturbances of the Secondary Circuits in Gas Insulated Substation due to Disconnecter Switching», *International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, 2003. p. 1 – 6.

[102] Ivo Uglešic, Božidar Filipovic-Grcic, and Srečko Bojic, «Transients Caused by Uncontrolled and Controlled Switching of Circuit Breakers», *The International Symposium on High-Voltage Technique «Höfler's Days»*, Portoroz, 2013, p. 1 – 7.

[103] T. Koshizuka, T. Shinkai, K. Udagawa, H. Kawano, «Circuit Breaker Model using Serially Connected 3 Arc Models for EMTP Simulation», *International Conference on Power Systems Transients*, Kyoto, 2009. [Электронный ресурс]. http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2009/09IPST040.pdf.

[104] И. В. Черных, *Моделирование электротехнических устройств в MATLAB/SimPowerSystems и Simulink*. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2007.

[105] В. А. Воронин, «Повышение эффективности управления нормальными и аварийными электрическими режимами в районах мегаполисов», дис. канд. наук., Открытое Акционерное Общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», Москва, 2014.

[106] High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. *International standart IEC 62271-102*. First edition 2001-12.

[107] Д. А. Тихончук, «Коммутация батареи статических конденсаторов высокого напряжения выключателем с одним приводом» дис. канд. наук., Уфимский государственный авиационный технический университет, УФА, 2014.

[108] Ф. Р. Исмагилов, и Д. А. Тихончук, «Коммутация багарей статических конденсаторов 110 кВ», *Материалы VIII Международной научно-технической и практической конференции «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Энергоэффективность и энергосбережение»*, Москва, 2014.

[109] Д. В. Черноскутов, «Повышение коммутационной способности высоковольтной аппаратуры», автореф. дис. канд. наук., Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 2017.

[110] J. Huang, B. Shen, F. Yang, «Simulation Model of Shipboard Low Voltage Molded Case Circuit Breaker Based on PSCAD/EMTDC», *Journal of Power and Energy Engineering*, № 2, P. 532 – 540, 2014.

[111] Yakui Liu, Guogang Zhang, Jinggang Yang, Ke Zhao, and Shan Gao, «The Mathematical Model of Contact Resistance and Injected Current in DRM Tests of SF6 Circuit Breaker», *IEEE Transactions On Components, Packaging And Manufacturing Technology*, Vol. 8, Nr. 1, p. 82 – 87, 2018.

[112] К. Шимони, *Теоретическая электротехника*. Москва, СССР: Мир, 1964.

[113] Л. А. Бессонов, *Теоретические основы электротехники*. Москва, СССР: Высш. школа, 1973.

[114] Ю. П. Боглаев, *Вычислительная математика и программирование*. Москва, СССР: Высш.шк., 1990.

[115] Н. В. Рудевич, «Математична модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 59, с. 117 – 123, 2013.

[116] Б. Т. Кононов, А. О. Мушаров, та А. О. Нечаус, «Диференціальні рівняння перехідних процесів у високовольтній трифазній електричній мережі», *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, № 4(49), с. 114 – 117, 2016.

[117] Б. Т. Кононов, та А. О. Мушаров, «Перехідні процеси в трифазній електричній мережі при несанкціонованому втручанні в її роботу». *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, Випуск 3(36), с. 155 – 158, 2013.

[118] Barbara Florkowska, Wieslaw Nowak, and Rafal Tarko, Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepieciowych w liniach elektroenergetycznych wysokich napięć», *Przegląd Elektrotechniczny*, 1k, Str. 69 – 72, 2004.

[119] Ю. Н. Веприк, С. Н. Лебедка, и Ю. В. Веприк, «Математическое моделирование переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью в фазных координатах», *Електротехніка і Електромеханіка*, №3, с. 74 – 77, 2005.

[120] Ю. Н. Веприк, и А. А. Минченко, «Коммутационные перенапряжения в электропередаче 750 кВ», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 4, с. 17 – 20, 2009.

[121] Lei Liu, Xiang Cui, Senior Member, and Lei Qi, «Simulation of Electromagnetic Transients of the Bus Bar in Substation by the Time-Domain Finite-Element Method», *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, Nr. 4, p. 1017 – 1025, 2009.

[122] P. Stakhiv, Y. Kozak, O. Hoholyuk, «Discrete mathematical macromodel of electric transmission line», *Przegląd Elektrotechniczny*, NR 4, p. 272 – 274, 2013.

[123] П. А. Ионкин, *Теоретические основы электротехники. Нелинейные цепи и основы электромагнитного поля*. Москва, СССР: Высшая школа, 1976.

[124] Р. Е. Нестеров, Ф. Ю. Канев, и Н. А. Макенова, «Математическое моделирование линий электропередач и систем заземления», *Современные проблемы науки и образования*, № 1, 2015, [Электронный ресурс]. <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1/1680.pdf>.

[125] Е. Дмитриев, А. Гашимов, А. Наир, Н. Бабаева, «К вычислению расчетных параметров модели линии электропередачи с учетом коронирования ее проводов», *Электричество*, №12, с. 2 – 14, 2007.

[126] Hermann W. Dommel, «Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks», *IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems*, p. 388 – 399, 1969.

[127] В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, О. Г. Шпорлянский, В. В. Кучанський, «Дослідження резонансних перенапруг на ультра гармоніках парної кратності на ЛЕП 750 кВ», *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, Вип 29, с. 122 – 127, 2011.

[128] Vinesh Gamit, Vivek Karode, Karan Mistry, Pankaj Parmar, and Ashish Chaudhari, «Fault analysis on three phase system by auto reclosing mechanism», *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Volume 04, Issue 05, p. 292 – 298, 2005.

[129] Н. В. Сизганов, Е. Ю. Сизганова, Р. А. Петухов, и В. В. Шевченко, «Моделирование электропередачи Алтай – Итатская для исследования режимов трехфазного автоматического повторного включения», *ВЕСТНИК ИрГТУ*, № 2 (109), с. 86 – 93, 2016.

[130] M. H. Hesse, «Electromagnetic and electrostatic transmission-line parameters by digital computer», *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. 82, p. 282 – 290, 1963.

[131] О. М. Равлик, В. Я. Стецик, «Модельовання комутаційних процесів ліній надвисокої напруги 750 кВ», *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи», № 840, с. 102 – 106, 2016.

[132] О. М. Равлик, «Формування рівнянь стану, що описують процеси в електричних мережах, системах їх захисту й автоматики, у контурних координатах», *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи»*, № 615, с. 116 – 125, 2008.

[133] О. М. Равлик, «Комплексний підхід до формування математичних моделей елементів електричних мереж, пристроїв захисту й автоматики», *Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету «Електротехніка і енергетика»*, № 8(140), с. 114 – 117, 2008.

[134] Г. М. Лисяк, О. М. Равлик, М. С. Сегеда, «Аналіз аварійних процесів в електричній мережі 750 кВ», *Технічна електродинаміка*. № 1, с. 49 – 52, 2003.

[135] Г. М. Лисяк, О. М. Равлик, В. Й. Іваноньків, «Математичне моделювання аварійних режимів в автотрансформаторах підстанцій 750 кВ», *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Серія: «Електроенергетичні та електромеханічні системи»*, № 449, с. 108 – 116, 2002.

[136] В. В. Петкевич, *Теоретическая механика*. Москва, СССР: Наука, 1981.

[137] Л. Д. Ландау, и Е. М. Лившиц, *Теория поля*. Москва, СССР: Энергия, 1973.

[138] A. Chaban, «Non-Conservative Lagrangian», *Технічні вісті*, № 1(35), 2(36), с. 20 – 21, 2012.

[139] А. В. Чабан, *Математичне моделювання коливних процесів в електромеханічних системах*. Львів, Україна: В-во Тараса Сороки, 2008.

[140] Е. Черри, У. Миллар, «Некоторые новые понятия и теоремы в области нелинейных систем», *Автоматическое регулирование: Сб. материалов конф, Кренфилд*, 1954, с 261 – 273.

[141] Л. Р. Нейман, и К. С. Демирчан, *Теоретические основы электротехники*. Ленинград, СССР: Энергоиздат, 1981.

[142] К. Васидзу, *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. Москва, СССР: Мир, 1987.

[143] Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, и С. В. Страхов, *Основы теории цепей*. Москва, СССР: Энергия, 1965.

[144] Передача енергії постійним струмом високої напруги. [Електронний ресурс] <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4/section-2/section-2/2-4>.

[145] М. В. Василенко, *Теорія коливаний*. Київ, Україна: Вища школа, 1992.

[146] Ю. М. Вепрік, «Розвиток теорії і методів математичного моделювання режимів роботи електричних систем з несиметрією», автореф. дис. д-ра наук., Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2010.

[147] Operating instructions for the circuit breaker LTB 362-800 (T) E4. ABB. 2009.

[148] Ю. І. Тугай, В. А. Мельничук, «Перехідні процеси в розподільчих пристроях електростанцій з елегазовими вимикачами», *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, Вип. 39, с. 5 – 8, 2014.

[149] И. В. Коваленко, и А. А. Егонский, *Электроэнергетика. Производство Электроэнергии*. Красноярск, Россия: ИПЦ КГТУ, 2006.

[150] L. Claessens, R. Drews, M. Govindarajan, H. Lohrber, and P. Robin-Jouan, «Advanced Modelling Methods for Circuit Breakers», *CIGRE Conference 2006*, Paris, 2006.

[151] А. В. Ільченко, та В. О. Ломакін, «Зміна моменту інерції дезаксіального кривошипно-шатунного механізму поршневого двигуна внутрішнього згоряння», *Вісник ЖДТУ*, №1(44), 2008, [Електронний ресурс]. <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/81846/79582>.

[152] K. Pomorski, *Mechanika teoretyczna*. Lublin, Polska: Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 2000.

[153] М. А. Павловський, *Теоретична механіка*. Київ, Україна: Техніка, 2002.

[154] Дж. М. Самервилл, *Электрическая дуга*. Москва, СССР: Госэнергоиздат, 1962.

[155] Г. А. Сисоян, *Электрическая дуга в электрической цепи*. Москва, СССР: Металургиздат, 1961.

[156] ДСТУ 2848-94. *Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення. Держстандарт України*. Київ, 1995.

[157] ГОСТ Р 52565-2006. *Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. Стандартинформ*. Москва, 2007.