

В. Р. Левонюк, Г. М. Лисяк, * А. В. Чабан
Львівський національний аграрний університет,
кафедра ЕТС

* Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра ЕСУ

МОДЕЛЮВАННЯ ВИМИКАЧА НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕСИЛАННЯ ЕНЕРГІЇ

© Левонюк В. Р., Лисяк Г. М., Чабан А. В., 2018

На основі узагальненого міждисциплінарного (інтердисциплінарного) методу математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації інтегрального варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського, запропоновано математичну модель вимикача надвисокої напруги, основний акцент у якій зроблено на моделюванні роботи механізму переміщення його контактів. Представлено результати комп'ютерної симуляції характерних перехідних процесів фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії з врахуванням впливу на них електромеханічних процесів механізму переміщення контактів вимикача.

Ключові слова: математичне моделювання, принцип Гамільтона–Остроградського, рівняння Ейлера–Лагранжа, механізм переміщення контактів вимикача, електротехнічна система пересилання енергії, електрична мережа, перехідні процеси.

On the basis of a generalized interdisciplinary (interdisciplinary) method of mathematical modeling, which is based on modifications of the integral variational principle of Hamilton-Ostrogradsky, proposed mathematical model of the ultra-high voltage circuit-breaker the main emphasis of which is placed on modeling work the mechanism of moving his contacts. Presented results of computer simulation of characteristic transient processes in the fragment of the electrical energy transfer system taking into account the impact on them electromechanical processes the mechanism of movement contacts of the circuit-breaker.

Key words: mathematical modeling, Hamilton-Ostrogradsky principle, Euler-Lagrange equation, mechanism for moving contacts of the circuit-breaker, electrical energy transfer system, electrical network, transient processes.

Постановка проблеми

Відомо, що комутаційні процеси в електротехнічних системах пересилання енергії (ЕТСПЕ) є важливою актуальною проблемою, особливо коли це стосується електричних мереж надвисокої напруги. Традиційні допущення щодо моделювання розривів струмів у вимикачах виключно в нулі не завжди достатньо адекватно відображають картину реальних перехідних процесів, тоді як опис розривів першого роду функціональних залежностей системи тягне за собою надскладну проблему пошуку початкових умов комутацій в об'ємній динамічній системі [1].

При цьому у більшості випадків не береться до уваги вплив електромеханічних процесів під час роботи механізмів переміщення контактів вимикачів, незважаючи на те, що швидкість їх перебігу співвимірні із швидкістю протікання електромагнітних процесів [2].

Не є новиною, що для опису реальних процесів горіння дуги у вимикачі треба задіяти надзвичайно складний апарат прикладної фізики, зокрема, рівняння електромагнітного поля (у потенці-

алах (векторного й скалярного) або, традиційно, у векторах електромагнітного поля (\mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{D})), рівняння Фур'є, теорію плазми з урахуванням впливу середовища, тобто його фізико-хімічних властивостей, а також теорію Лагранжа щодо опису механічних процесів переміщення контактів вимикача. На нинішній день моделі згаданих пристроїв якщо й побудовані, то є надзвичайно складними й громіздкими, а відтак, не завше прийнятні в задачах аналізу перехідних процесів у ЕТСПЕ [3].

Відтак, проблема побудови ефективних, достатньо адекватних та відносно простих моделей комутаційних апаратів, у тім і вимикачів надвисокої напруги, – на часі.

Аналіз останніх досліджень

Доволі багато науковців займаються аналізом перехідних електромагнітних процесів, що відбуваються в ЕТСПЕ. Ми розглянемо лише деякі з основних праць, які, на нашу думку, є найближчими до тематики нашої праці.

Так, у статті [4] досліджено перехідні електромагнітні процеси в електричних мережах 500 – 1150 кВ за наявності аперіодичних складових в останніх під час комутацій компенсованої лінії електропередачі, які здійснюються елегазовими вимикачами, а також наведено переваги та недоліки реалізації комутацій у практичному використанні.

У роботі [5] репрезентовано дослідження електромагнітних перехідних процесів під час вимкнення струмів короткого замикання на лінії електропередачі 500 кВ з увімкненими шунтувальними реакторами.

У праці [6] на основі математичного моделювання процесів комутації у повітряних лініях 500 кВ, оснащених шунтувальними реакторами, проаналізовано причини технологічних порушень, які часто супроводжують ці комутації. Для запобігання цим порушенням запропоновано заходи, які необхідно передбачати при проектуванні повітряних ліній високої напруги.

Автор роботи [7] розробив математичну модель та алгоритм роботи елегазового вимикача, який здійснює комутацію батареї статичних конденсаторів 110 кВ з урахуванням переміщення і швидкості руху контактів.

У роботі [8] розглянуто формалізовані методи розрахунку електромагнетних процесів у електроенергетичних системах, висвітлено основи формалізованих методів аналізу електричних кіл та математичні моделі їх режимів і процесів, але в цій праці комутаційні процеси з погляду розривів першого роду функціональних залежностей не розглядаються та не враховуються реальні динамічні процеси у вимикачах.

Аналізуючи огляд доступної літератури, можна стверджувати, що задача побудови адекватних моделей вимикачів надвисокої напруги ще остаточно не розв'язана, а робота в цьому напрямі залишається актуальною. Так, зокрема, дослідження перехідних процесів під час комутацій ліній електропередач надвисокої напруги зазвичай проводять за допомогою програмних комплексів MatLab, EMTP-RV (зокрема [4–6]) та ін., які здійснюють розрив функції струму вимикача виключно в нулі, що не завше відповідає дійсності.

Формування цілей статті

Метою роботи є створення математичної моделі вимикача надвисокої напруги із врахуванням електромеханічних процесів під час роботи механізму переміщення його контактів для аналізу комутаційних перехідних процесів в електротехнічних системах пересилання енергії.

Виклад основного матеріалу

Запропоновано модель однієї з фаз фрагмента ЕТСПЕ з вимикачем надвисокої напруги, основний акцент у якій зроблено на моделюванні роботи механізму переміщення контактів цього вимикача. Тому надалі досліджуватимемо лише нормальні усталені режими й аварійні перехідні процеси під час виникнення коротких замикань (к.з.) та їх вимкнення вимикачем.

Для побудови згаданої моделі використано метод інтердисциплінарного моделювання, що ґрунтується на модифікації відомого принципу Гамільтона–Остроградського [9]. Відомо, що такий науковий підхід є доцільним під час моделювання складних динамічних систем різної фізичної природи [10].

На рис. 1 наведено розрахункову заступну схему однієї з фаз прийнятого для аналізу характерного фрагмента ЕТСПЕ у вигляді електричної мережі 750 кВ, що з'єднує на паралельну роботу дві електроенергетичні системи (ЕЕС). ЕЕС враховуються своїми фазними електрорушійними силами (ЕРС), внутрішніми активними опорами та індуктивностями. Лінію електропередачі наведено у вигляді П-заступної схеми із зосередженими параметрами. Вимкнення струмів к.з. здійснюватиметься вимикачем 750 кВ, електрична заступна схема якого має вигляд паралельно з'єднаних еквівалентних нелінійного активного опору та ємності (рис. 1).

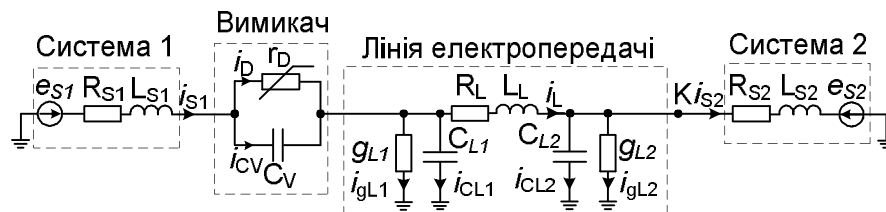


Рис. 1. Розрахункова заступна схема досліджуваного фрагмента ЕТСПЕ

Зазначимо, що урахування дугових процесів під час комутації у вимикачі надвисокої напруги є надзвичайно складною задачею, тому ми враховуємо їх в першому наближенні за допомогою активних опорів з нелінійними характеристиками, опираючись на працю [11], у якій сказано про внутрішню енергію стовпа дуги, що однозначно пов'язана з його електричним опором експоненціальною залежністю. Усі стани стовпа дуги з одною і тією самою внутрішньою енергією електрично ідентичні, оскільки електричне коло реагує тільки на опір. Також цю теорію підтримано і в праці [3], де автори додатково стверджують, що в схемах заміщення електричних мереж дугогасильні пристрої елегазових вимикачів можна враховувати еквівалентним нелінійним активним опором міжконтактного проміжку. Параметри цього опору визначаються характеристиками електричної мережі, дугогасильного пристрою та механізму переміщення контактів, тобто гасіння дуги – це перехідний процес, під час якого його значення від початкового малого прямує практично до безмежності із зростанням міжконтактного проміжку; а на контактах дугогасильного пристрою відновлюється напруга мережі. Якщо детальніше розглянути дугові процеси в міжконтактному проміжку вимикача, то тут треба зазначити, що для кожного малого проміжку Δx є своя вольт-амперна характеристика дуги. Але цілком зрозуміло, що це тягне за собою урахування двовимірних параметрів системи, відтак власне ми використовуємо спрощені підходи.

Для досліджень нами прийнято елегазовий вимикач надвисокої напруги фірми АВВ типу ЛТВ 362-800 (Т) Е4, який достатньо широко використовується в електричних системах України. Кожна фаза вимикача складається з двох послідовно з'єднаних між собою модулів. Кожен із модулів має по дві пари послідовно з'єднаних контактів, паралельно до яких під'єднано конденсатори для рівномірного розподілу напруги, як показано на рис. 2. За умови однакових нелінійних характеристик активних опорів та однакових значень ємностей параметри еквівалентних елементів електричної заступної схеми вимикача на рис. 1 матимуть такі значення: $r_D = 4r_{DR}$, $C_V = C_{VR}/4$.

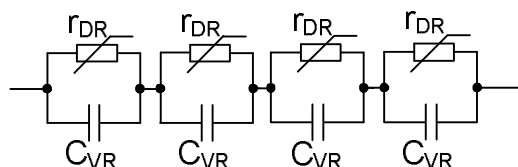


Рис. 2. Заступна електрична схема вимикача

Цілком очевидно, що значення згаданого еквівалентного нелінійного опору r_D залежатиме від відстані між контактами вимикача, яка, своєю чергою, залежатиме від швидкості їх розходження. Відтак виникає потреба в розробленні математичної моделі вимикача, яка враховувала б електромеханічні процеси під час роботи механізму переміщення його контактів.

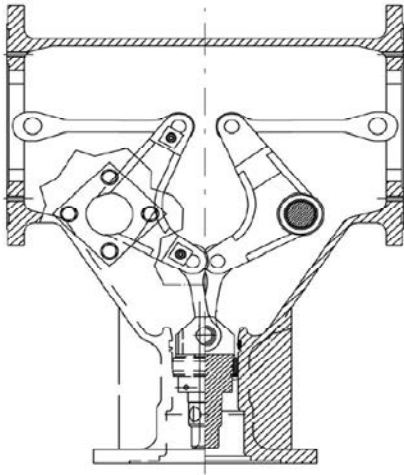


Рис. 3. Механізм переміщення контактів елегазового вимикача надвисокої напруги типу LTB 362-800 (Т) Е4

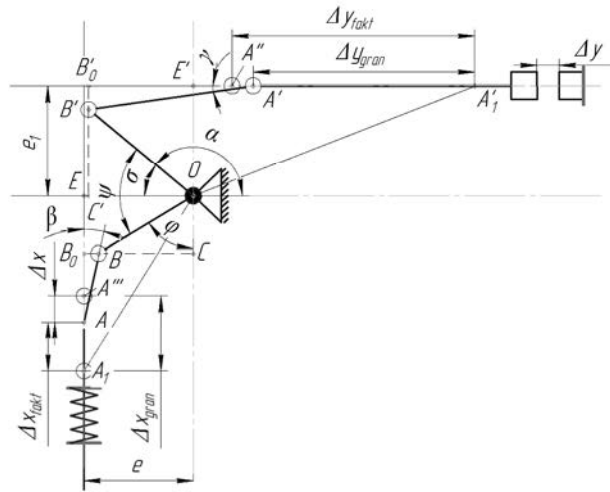


Рис. 4. Кінематична схема дезаксіального кривошипно-шатунного механізму переміщення контактів вимикача

На рис. 3 зображено вигляд механізму переміщення контактів згаданого елегазового вимикача надвисокої напруги фірми АВВ типу LTB 362-800 (Т) Е4. Він складається з двох кривошипно-шатунних механізмів, які симетричні відносно поздовжньої осі цілого механізму. Механізм приводиться в рух за допомогою пружини (не показано на рисунку).

Рис. 4 репрезентує кінематичну схему кривошипно-шатунного механізму. Особливістю цього механізму є те, що вісь руху контактів та вісь привідної пружини не лежать на одній осі із центром кривошипно-шатунного механізму. У техніці цей кривошипно-шатунний механізм називається дезаксіальним.

Ми пропонуємо аналізувати перехідні процеси у фрагменті електричної мережі, зображеної на рис. 1, за модифікованим принципом Гамільтона–Остроградського [9]. Це дає можливість уникнути декомпозиції єдиної динамічної системи та одержати вихідні рівняння стану виключно за єдиним енергетичним підходом, побудовою розширеної функції Лагранжа [9].

Для досліджуваної нами системи розширений функціонал дії за Гамільтоном–Остроградським та його варіація виглядатимуть так [9]:

$$S = \int_0^{t_1} L^* dt, \quad dS = \int_0^{t_1} \left(\frac{\partial L^*}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_i} d\dot{q}_i \right) dt; \quad (1)$$

де S – дія за Гамільтоном–Остроградським; L^* – розширена функція Лагранжа; q – узагальнена координата; $\dot{q} = dq/dt$ – узагальнена швидкість; i – кількість ступенів свободи системи (для голономних систем).

Розширена функція Лагранжа виглядає так [9]:

$$L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (2)$$

де L^* – розширена функція Лагранжа; \tilde{T}^* – кінетична коенергія; P^* – потенціальна енергія; Φ^* – енергія дисипації; D^* – енергія сторонніх непотенціальних сил.

Запишемо елементи розширеної функції Лагранжа [9]:

$$T^* = \frac{mV_x^2}{2} + \frac{L_{S1}i_{S1}^2}{2} + \frac{L_L i_L^2}{2} + \frac{L_{S2}i_{S2}^2}{2}, \quad P^* = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{Q_{L1}^2}{2C_{L1}} + \frac{Q_{L2}^2}{2C_{L2}} + \frac{Q_V^2}{2C_V} \quad (3)$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (k_d V_x^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (R_{S1}i_{S1}^2 + R_L i_L^2 + R_{S2}i_{S2}^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (r_D i_D^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (g_{L1}^{-1} i_{gL1}^2 + g_{L2}^{-1} i_{gL2}^2) dt; \quad (4)$$

$$D^* = 4F_X \Delta x + \int_0^t (e_{S1}i_{S1} + e_{S2}i_{S2}) dt, \quad (5)$$

де L_{S1}, L_{S2}, L_L – індуктивності систем 1, 2 та лінії; R_{S1}, R_{S2}, R_L – активні опори систем 1, 2 та лінії; e_{S1}, e_{S2} – фазні ЕРС систем 1 та 2; C_{L1}, C_{L2} – ємності лінії; C_V – ємність еквівалентного конденсатора, який увімкнено паралельно до еквівалентного розриву контактів вимикача; Q_{L1}, Q_{L2}, Q_V – електричні заряди ємностей C_{L1}, C_{L2}, C_V відповідно; i_{S1}, i_{S2}, i_L – струми систем 1, 2 та струм у лінії; g_{L1}, g_{L2} – активні провідності лінії; i_{gL1}, i_{gL2} – струми витоку лінії; r_D – опір еквівалентної дуги; i_D – струм еквівалентної дуги; Δx – відстань переміщення пружини; V_x – швидкість переміщення пружини; k – коефіцієнт пружності пружини; k_d – коефіцієнт дисипації; m – приведена маса контактів; F_X – виштовхувальна сила дуги одного контакту, зведена до системи координат руху пружини.

Задля зменшення обсягу статті ми не наводимо виведення рівнянь. Ознайомитися з методикою отримання рівнянь подібного плану можна, наприклад, у нашій праці [12]. Запишемо кінцеві рівняння Ейлера–Лагранжа:

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}}(e_{S1} - R_{S1}i_{S1} - u_V - u_{CL1}), \quad \frac{du_{CL1}}{dt} = \frac{1}{C_{L1}}(i_{S1} - i_L - i_{gL1}), \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_L}(u_{CL1} - R_L i_L - u_{CL2}); \quad (6)$$

$$\frac{du_{CL2}}{dt} = \frac{1}{C_{L2}}(i_L - i_{gL2} - i_{S2}), \quad \frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}}(u_{CL2} - R_{S2}i_{S2} - e_{S2}), \quad \frac{du_V}{dt} = \frac{1}{C_V} \left(i_{S1} - \frac{u_V}{r_D} \right); \quad (7)$$

$$i_{gL1} = g_{L1}u_{CL1}, \quad i_{gL2} = g_{L2}u_{CL2}; \quad (8)$$

$$\frac{d\Delta x}{dt} = V_x, \quad \frac{dV_x}{dt} = \frac{k\Delta x + 4F_X + k_d V_x}{m}, \quad (9)$$

де u_{CL1}, u_{CL2} – напруги на початку та в кінці лінії відповідно; u_V – напруга між контактами вимикача.

Ми вже згадували, що опір дуги r_D є нелінійним і залежить від відстані між контактами вимикача. Відтак, з'являється потреба у розробленні математичної моделі механізму приводу руху контактів вимикача.

Запишемо вираз для визначення відстані між контактами (рис. 4):

$$\Delta y = \Delta y_{fakt} - \Delta y_{gran}, \quad (10)$$

де Δy_{fakt} – відстань, що виникає після переміщення точки $A\zeta$ в точку A^2 , до розходження контактів $\Delta y_{fakt} = \Delta y_{gran}$.

Запишемо вираз для пошуку Δy_{fakt} (рис. 4):

$$\Delta y_{fakt} = |E'A'_1| - |E'A'| \equiv |A'A'_1|, \quad (11)$$

де

$$|E'A'_1| = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2}, \quad |E'A'| = |B'_0A'| - |B'_0E'|; \quad (12)$$

$$|B'_0E'| \equiv |C'O| = |OB'| \cos s, \quad |B'_0A'| = |B'A'| \cos g. \quad (13)$$

Підставивши вирази з (13) у другий вираз (12) та одержаний результат у вираз (11), отримаємо:

$$\Delta y_{fakt} = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2} - [|B'A'| \cos g - |OB'| \cos s]. \quad (14)$$

Проаналізувавши вираз (14), бачимо, що в ньому є невідомі величини $\cos \gamma$ та $\cos \sigma$. Займемося пошуком цих величин за рис. 4:

$$s = 180 - a, \quad a = 270 - (j + y), \quad s = (j + y) - 90^\circ; \quad (15)$$

$$|C'B'| = |OB'| \sin s = e_1 - |B'A'| \sin g, \quad (16)$$

звідки

$$\sin g = \frac{|OB'| \sin s - e_1}{-|B'A'|}. \quad (17)$$

Відповідно до тригонометричних формул вираз (17) дорівнює:

$$\cos g = \sqrt{1 - \left[\frac{|OB'| \sin s - e_1}{-|B'A'|} \right]^2}. \quad (18)$$

Підставивши третій вираз із (15) та вираз (18) у (14), отримаємо:

$$\Delta y_{fakt} = \sqrt{(|OB'| + |B'A'|)^2 - e_1^2} - \left[|B'A'| \sqrt{1 - \left[\frac{|OB'| \sin(j+y) - 90^\circ}{-|B'A'|} \right]^2} - |OB'| \cos(j+y) - 90^\circ \right]. \quad (19)$$

За рівнянням (19) можна знаходити відстань між контактами у вимикачі, знаючи кут φ . Цілком зрозуміло, що кут φ має бути функцією від Δx . Займемося пошуком згаданого кута.

Запишемо вираз для знаходження Δx_{fakt} (рис. 4):

$$\Delta x_{fakt} = |EA_1| - |EA| \equiv |AA_1|, \quad (20)$$

де

$$|EA_1| = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2}, \quad |EA| = |B_0A| + |B_0E|; \quad (21)$$

$$|B_0E| \equiv |CO| = |BO| \cos j, \quad |B_0A| = |AB| \cos b. \quad (22)$$

Підставивши вирази з (22) у другий вираз (21) та одержаний результат у (20) отримаємо:

$$\Delta x_{fakt} = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2} - [|BO| \cos j + |AB| \cos b]. \quad (23)$$

Аналізуючи вираз (23), бачимо, що в ньому є невідомі величини $\cos \varphi$ та $\cos \beta$. Згідно з рис. 4 запишемо співвідношення:

$$|CB| = |BO| \sin j = e - |AB| \sin b. \quad (24)$$

Звідки

$$\sin b = \frac{|BO| \sin j - e}{-|AB|}. \quad (25)$$

Відповідно до тригонометричних залежностей запишемо:

$$\cos b = \sqrt{1 - \left[\frac{|BO| \sin j - e}{-|AB|} \right]^2}. \quad (26)$$

Підставивши (26) до (23), отримаємо:

$$\Delta x_{fakt} = \sqrt{(|BO| + |AB|)^2 - e^2} - |BO| \cos j - |AB| \sqrt{1 - \left[\frac{|BO| \sin j - e}{-|AB|} \right]^2}. \quad (27)$$

Аналізуючи вираз (27), бачимо, що у ньому є невідома величина Δx_{fakt} . Згідно з рис. 4 Δx_{fakt} дорівнює:

$$\Delta x_{fakt} = \Delta x_{gran} - \Delta x. \quad (28)$$

Вираз (27) є нічим іншим, як залежністю $\Delta x_{fakt}(\varphi)$, а нам потрібна для виразу (19) обернена залежність. Однак аналітичний пошук згаданої залежності унеможливується коренем квадратним у виразі (27). Потрібну нам залежність можемо знайти у такий спосіб. Спочатку будемо графічну залежність $\Delta x_{fakt}(\varphi)$ (зрозуміло, що під розміри нашого механізму), після чого графічно будемо обернену функцію $\varphi(\Delta x_{fakt})$ та отримуємо її табличні значення. За допомогою апроксимації таблично заданої функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ поліномом шостого порядку отримуємо:

$$j = -250024 \Delta x_{fakt}^6 + 169265 \Delta x_{fakt}^5 - 45136 \Delta x_{fakt}^4 + 6044 \Delta x_{fakt}^3 - 427,4 \Delta x_{fakt}^2 + 22,78 \Delta x_{fakt} + 0,6194 \quad (29)$$

Тестові розрахунки для вже згаданого елегазового вимикача проводили за формулами (9), (10), (19), (28),

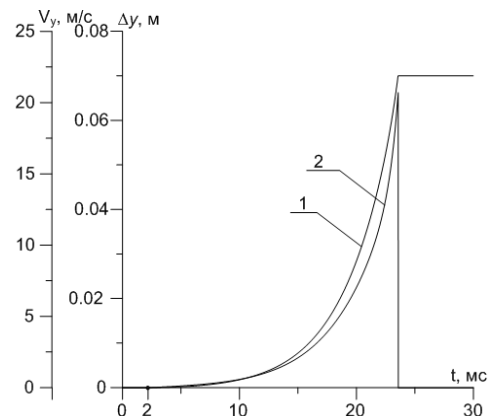


Рис. 5. Залежності відстані між контактами (1) та швидкості їх розходження (2) для одного розриву вимикача

(29) із такими параметрами: $k = 325000$ Н/м, $m = 10$ кг, $BO = 0,13$ м, $AB = 0,11$ м, $e = 0,13$ м, $BO = 0,16$ м, $A\mathcal{B}c = 0,2$ м, $e_1 = 0,13$ м, $\psi = 86,5^\circ$, $\Delta x_{gran} = 0,16$ м, $\Delta y_{gran} = 0,06$ м, $F_X = 0$ Н, $k_d = 0$ Нс/м.

На рис. 5 зображено залежності відстані між контактами одного розриву вимикача (крива 1) та швидкості їх розходження (крива 2) як функції часу відповідно. Розходження контактів розпочалося у момент часу $t = t_{PK} = 2$ мс із початку комп'ютерної симуляції. З рисунка бачимо, що ці залежності є нелінійними і при заданих параметрах вимикача повне розходження контактів (7 см) завершилося в момент часу $t = t_B = 23,56$ мс, тобто тривало $\Delta t_{PK} = t_B - t_{PK} = 21,56$ мс, що відповідає його робочим характеристикам, а відтак підтверджує адекватність моделі механізму переміщення контактів вимикача.

Варто зауважити, що адекватність математичної моделі кінематичної системи вимикача (див. рис. 4) було перевірено також за допомогою програмного комплексу COMPAS 3D V13.

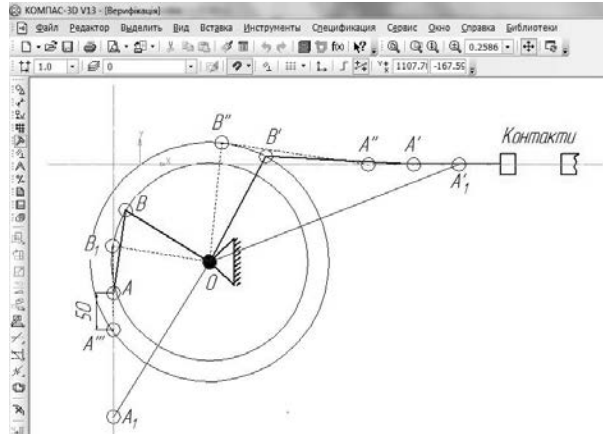


Рис. 6. Діалогове вікно програмного комплексу COMPAS 3D V13 під час проведення верифікації

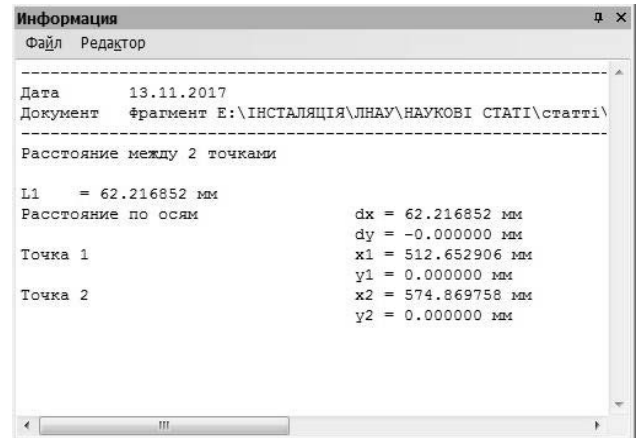


Рис. 7. Діалогове вікно інформації про відстань між контактами

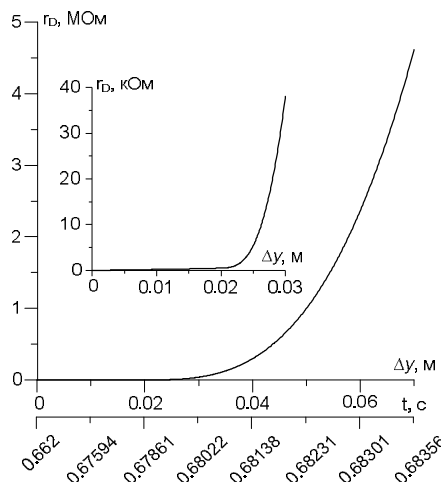


Рис. 8. Залежність опору міжконтактного проміжку вимикача від відстані між контактами

Результати верифікації

Δx , sm	Δy_{COMPAS} , sm	Δy , sm
1,0	1,208	1,189
2,0	2,451	2,482
3,0	3,710	3,702
4,0	4,971	4,923
5,0	6,221	6,148

На рис. 6, 7 репрезентовано діалогові вікна програмного комплексу COMPAS 3D V13 під час верифікації моделі механізму переміщення контактів вимикача, починаючи від моменту їх розмикання. Пружина перемістила привідний важіль на 5 см (рис. 6), при цьому рухомий контакт перемістився на 6,221 см (рис. 7, параметр L1). У таблиці наведено результати верифікації для п'яти положень кривошипно-шатунного механізму, які свідчать про те, що похибка становила

менше за 2 %. Величину похибки можна пояснити апроксимацією функції $\varphi(\Delta x_{fakt})$ поліномом шостого порядку (29). Отже, можемо сказати, що модель механізму приводу руху контакту є адекватною.

Для апроксимації залежності $r_D(\Delta y)$, (рис. 8) ми використали інтерполяційні сплайни третього порядку та отримали вирази, які описують прийняті для досліджень залежності еквівалентного опору міжконтактного проміжку на відповідних інтервалах розходження контактів вимикача:

$$r_{D_{0+0,01}} = 0,1 + 21990\Delta y_{0+0,01}; \quad (30)$$

$$r_{D_{0,01+0,02}} = 220 + 21990(\Delta y_{0,01+0,02} - 0,01) + 8,01 \cdot 10^7 (\Delta y_{0,01+0,02} - 0,01)^3; \quad (31)$$

$$r_{D_{0,02+0,07}} = 520 + 46020(\Delta y_{0,02+0,07} - 0,02) + 2,403 \cdot 10^6 (\Delta y_{0,02+0,07} - 0,02)^2 + 3,6886 \cdot 10^{10} (\Delta y_{0,02+0,07} - 0,02)^3. \quad (32)$$

Згадані залежності (рис. 8) мають спочатку повільно зростаючий характер (модельюють горіння дуги), а при розходженні контактів на відстань понад 0,02 м – різко зростаючий нелінійний характер (модельюють згасання дуги).

Сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (6), (7), (9) з урахуванням (8), (10), (19), (28) – (32).

Результати комп'ютерної симуляції. Прийняті нижче параметри елементів заступної схеми (рис. 1) відповідають параметрам фрагмента реальної електричної мережі 750 кВ з лінією електропередачі завдовжки 360,5 км, а значення фазних ЕРС та їх початкових фаз – усталеному режиму передачі в систему 2 активної потужності близько 800 МВт: $e_{S1} = 593,5\sin(314t + 20,5^\circ)$ кВ, $e_{S2} = 598,0\sin(314t + 4,1^\circ)$ кВ, $R_{S1} = 2,032$ Ом, $R_{S2} = 2,41$ Ом, $L_{S1} = 0,161$ Гн, $L_{S2} = 0,141$ Гн, $R_L = 6,85$ Ом, $L_L = 0,333$ Гн, $C_{L1} = C_{L2} = 2,4 \cdot 10^{-6}$ Ф, $g_{L1} = g_{L2} = 5,8 \cdot 10^{-6}$ См, $C_V = 0,4 \cdot 10^{-9}$ Ф. Під час симуляції ми нехтуємо втратами енергії у всьому механізмі та виштовхувальною силою дуги.

Комп'ютерна симуляція перехідних процесів, яким передував вихід системи на згаданий усталений режим роботи, здійснювалась для різних моментів вимкнення вимикачем струму к.з. Періоди часу відповідних комутацій визначали з врахуванням рекомендацій міжнародної електротехнічної комісії [13]. Деякі характерні результати досліджень режимів к.з. у точці K в кінці лінії (рис. 1) наведено на рис. 9 – 14.

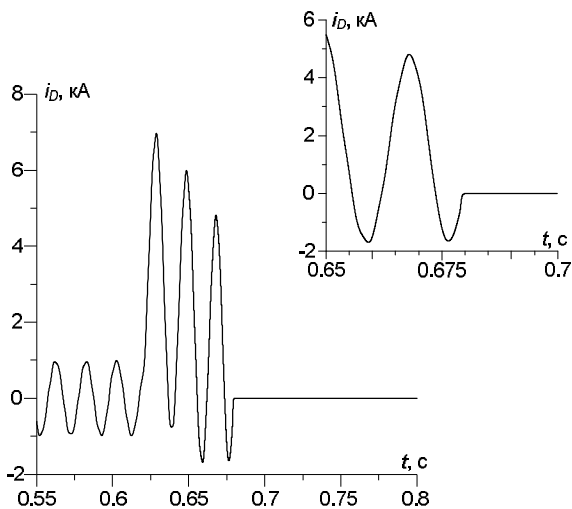


Рис. 9. Струм через вимикач від системи 1

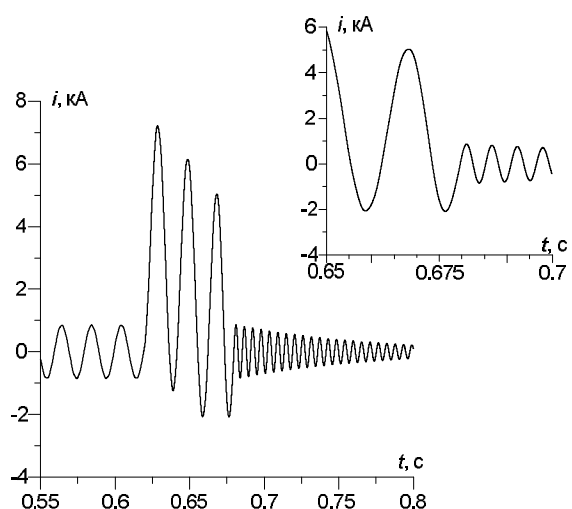


Рис.10. Струм в кінці лінії

На рис. 9–13 показано перехідний процес під час к.з. в кінці лінії для наведеної нижче симуляції послідовності операцій його виникнення та вимкнення вимикачем. Після виходу на усталений режим до моменту виникнення к.з. амплітуда струму, що протікає від системи 1 через вимикач (рис. 9), становила 0,970 кА, а в кінці лінії – 0,846 кА (рис. 10). У момент часу $t_{КЗ} = 0,62$ с від початку комп'ютерної симуляції виникло к.з. у точці K . Ударний струм через вимикач сягнув 6,952 кА, а в кінці лінії – 7,213 кА відповідно. Через 42 мс (час спрацювання релейного захисту $\Delta t_{РЗ} = 20$ мс плюс власний час вимкнення вимикача $\Delta t_{ВВ} = 22$ мс), тобто в момент часу $t_{РК} = 0,662$ с (рис. 8) під час переходу струму вимикача через нульове значення (рис. 9) почалося розмикання контактів вимикача, яке тривало $\Delta t_{РК} = 21,56$ мс, отже, в момент часу $t_{В} = 0,68356$ с операція вимкнення завершилася (рис. 5 і рис. 8 відповідно). При цьому час горіння дуги $\Delta t_{Д}$

становив близько 18 мс, а повний час вимкнення вимикача $\Delta t_B = \Delta t_{BB} + \Delta t_D = 40$ мс. Після вимкнення вимикача в лінії виник перехідний процес у вигляді згасаючих вільних коливань струму з поступовим його зменшенням до нуля.

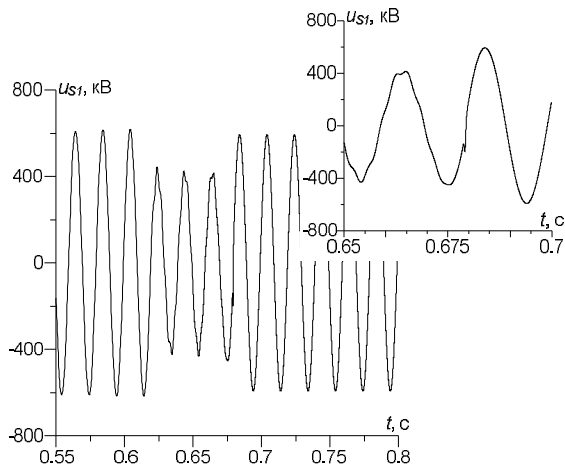


Рис. 11. Напряга на вимикачі з боку системи 1

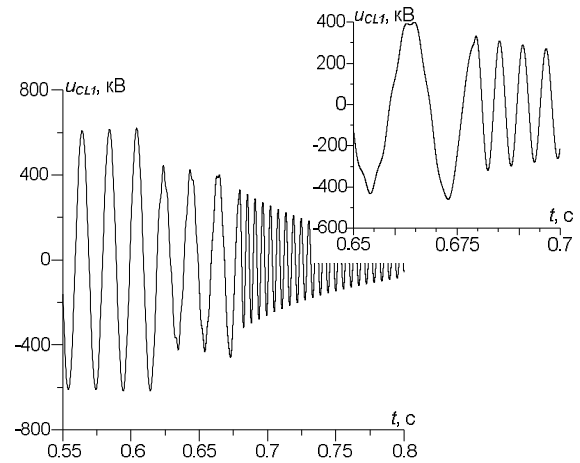


Рис. 12. Напряга на вимикачі з боку лінії

Рис. 11 та 12 репрезентують перехідні фазні напруги на вимикачі з боку системи 1 та з боку лінії (тобто на її початку) відповідно. Аналізуючи перший рисунок, бачимо, що до к.з. амплітуда фазної напруги мала значення 612 кВ, тобто близьке до номінального, під час к.з. зменшилася до 420 кВ, а після вимкнення лінії практично відновилася і зросла до значення напруги системи 1. Аналізуючи другий рисунок, бачимо, що до моменту вимкнення к.з., як і слід було очікувати, напруга на вимикачі з боку лінії така сама, як і з боку системи 1. Як вже було сказано, після вимкнення вимикача в лінії виник перехідний процес, зокрема й у вигляді згасаючих вільних коливань напруги на вимикачі з боку лінії з поступовим її зменшенням до нуля. Слід зазначити, що за прийнятих заступної схеми лінії електропередачі та її параметрів значення кутової частоти вільних коливань згаданих струму (рис. 10) та напруги лінії (рис. 12) становить орієнтовно 3,6 відносно основної частоти ЕРС, а їх згасання відбувається з постійною часу близько 0,1 с.

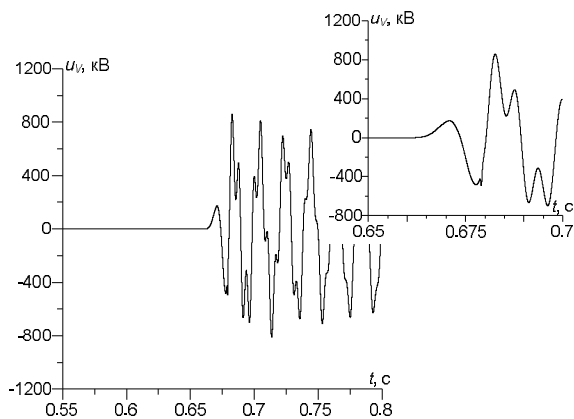


Рис.13. Напряга між виводами вимикача

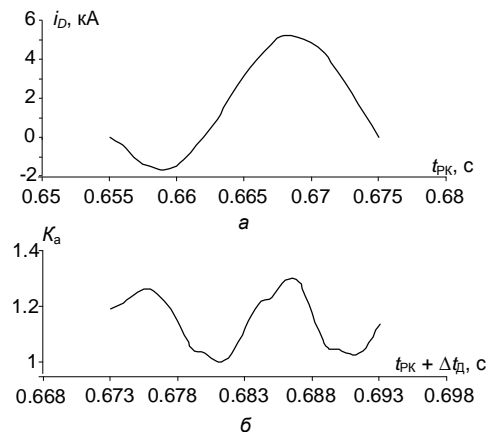


Рис.14. Значення струму КЗ через вимикач (а) та відповідні їм коефіцієнти амплітуди ПВН (б)

Залежність напруги між виводами вимикача від часу показано на рис. 13. З рисунка бачимо, що після вимкнення струму відновна напруга також містить згасаючі вільні коливання згаданої вище частоти, зумовлені перехідним процесом у вимкненій лінії. При цьому найбільше значення перехідної відновної напруги (ПВН) становило 859 кВ, а коефіцієнт перевищення амплітуди ПВН $K_a = 1,03$, тобто є меншим за нормоване значення 1,54 [14, 15].

Відомо, що рівень ПВН залежить від значення струму к.з. через вимикач у момент початку розходження його контактів. Такі дослідження проведено за наведених вище умов та симуляції послідовності операцій шляхом відповідної зміни лише часу спрацювання релейного захисту в діапазоні $\Delta t_{рз} = 13 \div 33$ мс. На рис. 14 наведено значення струму к.з. через вимикач для різних моментів часу початку розходження його контактів та відповідних їм коефіцієнтів перевищення амплітуди ПВН, значення яких лежать у діапазоні $K_a = 1,0 \div 1,29$. Описані вище процеси відповідають теоретичним положенням стосовно комутацій у електричних мережах, відтак, за прийнятих нами припущень, підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі вимикача надвисокої напруги та доцільність її використання під час дослідження перехідних процесів.

Висновки

1. Аналіз наукових публікацій та доступних програмних комплексів показав, що в більшості випадків дослідження комутаційних перехідних процесів в електротехнічних системах пересилання енергії проводять без урахування впливу на них електромеханічних процесів під час роботи механізмів переміщення контактів вимикачів, незважаючи на те, що швидкість їх перебігу співвимірна зі швидкістю протікання електромагнітних процесів. Тому науково-практична проблема побудови ефективних, достатньо адекватних та відносно простих моделей комутаційних апаратів є актуальною.

2. Розроблена математична модель вимикача надвисокої напруги дає можливість враховувати динаміку роботи механізму переміщення контактів і, в першому наближенні, горіння дуги між ними. Це уможливило дослідження реальних перехідних процесів у лінії електропередачі без надскладної процедури пошуку початкових умов комутації. Особливо це має практичне значення під час дослідження процесів в ЕТСПЕ, зокрема й електричних мережах, з декількома вимикачами.

3. Аналіз результатів верифікації моделі механізму переміщення контактів вимикача та комп'ютерної симуляції усталених режимів і перехідних процесів як під час виникнення коротких замикань в електричній мережі, так і під час їх вимкнення вимикачем підтверджують коректність та адекватність проведених у статті досліджень.

4. Підтверджено, що розвиток міждисциплінарних методів дослідження на основі модифікації відомого інтегрального варіаційного принципу Гамільтона–Остроградського дає можливість за єдиним енергетичним підходом будувати ефективні та адекватні математичні моделі динамічних систем різної фізичної природи (у нашому випадку електротехніки та прикладної механіки), що істотно розширює дослідницькі можливості евентуального користувача.

1. Шимони К. *Теоретическая электротехника* / К. Шимони. – М. : Мир, 1956. – 773 с. 2. *Руководство по эксплуатации выключателя LTB 362-800 (T) E4. ABB. 2009.* – 246 с. 3. *Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией* / Под ред. Ю. И. Вишневецкого. – СПб. : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2002. – 728 с. 4. *Methods of Performance Assurance for SF6 Circuitbreakers at Switchings of Compensated 500-1150 kV Overhead Power Lines* / Ivan Ye. Naumkin, Viktor N. Pod'yachev, Leonid I. Sarin, Danila V. Kochura. *International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) (July 18–20, 2013.)*. 5. *Simulation of the 500 kV SF6 circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing* / I. Naumkin, M. Balabin, N. Lavrushenko, R. Naumkin. *International Conference on Power Systems Transients (IPST2011) (June 14–17, 2011)*. 6. *Перенапряжения при коммутациях блочного трансформатора 500 кВ элегазовым выключателем* / Ю. А. Лавров [и др.] // *Электро*. – 2010. – № 6. – С. 24–27. 7. *Тихончук Д. А. Коммутация батареи статических конденсаторов высокого напряжения выключателем с одним приводом : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03* / Тихончук Дмитрий Александрович. – УФА, 2014. – 232 с. 8. *Ма-*

тематичне моделювання в електроенергетиці / Кириленко О. В. [та ін.]. – Львів : Львівська політехніка, 2010. – 608 с. 9. Чабан А. В. Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах / А. В. Чабан. – Львів : В-во Тараса Сороки, 2015. – 488 с. 10. Уайд Д. Електромеханическое преобразование энергии / Д. Уайд, Г. Вудсон. – Л. : Энергия, 1964. – 539 с. 11. Mayr O. Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens / O. Mayr // Archiv fur Elektrotechnik. – 1943. – 37, Heft 12. – S. 588–608. 12. Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters / Andriy Czaban, Marek Lis, Marcin Chrzan, Andrzej Szafraniec, Vitaliy Levoniuk // Przegląd elektrotechniczny. – 2018. № 1. p. 17–20. 13. High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. International standart IEC 62271-102. First edition 2001-12. 14. Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення : ДСТУ 2848-94. – К. : Держстандарт України, 1995. – 59 с. 15. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия : ГОСТ Р 52565-2006. – М. : Стандартинформ, 2007. – 91 с.