

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

УДК 621.3.027.7

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У ВИМИКАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ**

Віталій Левонюк¹, Галина Чабан²

¹Львівський національний аграрний університет
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: vitaliy_levoniuk@ukr.net

²Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: gtchaban@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.121>

Постановка проблеми. Нині неможливо уявити ведення національного господарства без використання електричної енергії. Як відомо, електрична енергія перед споживанням у середньому піддається п'яти трансформуванням та проходить через ряд різноманітних елементів електротехнічних систем. Для забезпечення безперебійної роботи елементів електротехнічних систем пересилання енергії, останні повинні постійно піддаватися різноманітним дослідженням, оптимізації та вдосконаленню. Одним із можливих та ефективних засобів дослідження на сьогодні є апарат математичного моделювання, використання якого дає змогу досліджувати різноманітні електротехнічні комплекси й системи, не залучаючи при цьому дорогих натурних експериментів.

Важливими елементами в електротехнічних системах пересилання енергії надвисокої напруги є вимикачі. Без сумніву, дослідження процесів, які проходять в електричних мережах, без урахування впливу вимикачів (наприклад, горіння дуги під час комутації) не дасть достовірної інформації про останні. Цілком зрозуміло, що горіння дуги в елегазовому вимикачі можливо описати лише зі залученням апарату прикладної фізики, зокрема рівняння електромагнетного поля, рівняння Фур'є, теорії плазми з урахуванням впливу середовища, тобто його фізико-хімічних властивостей, а також теорії Лагранжа щодо опису механічних процесів переміщення контактів вимикача. На сьогодні моделі згаданих пристроїв якщо й побудовані, то є надзвичайно складними та громіздкими, а отже, не завжди прийнятні в задачах аналізу перехідних

процесів в електротехнічних системах пересилання електроенергії.

Таким чином, проблема побудови ефективних, достатньо адекватних та відносно простих моделей комутаційних апаратів, зокрема й вимикачів надвисокої напруги, – на часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Система приводу руху контактів елегазових вимикачів надвисокої напруги на сьогодні не є широкодослідженим об'єктом. Причиною цього може бути хоча би й те, що виробники до кінця не розкривають усіх способів улаштування згаданих вимикачів та роблять із цього комерційну таємницю. Тому спектр праць із математичного моделювання вимикачів не є дуже широким.

У роботі [8] уже було здійснено детальний аналіз праць, в яких проводилося дослідження електромагнетних перехідних процесів в елементах електротехнічних систем пересилання енергії, однак там не було розглянуто праці, в яких аналізувалися комутаційні процеси.

У праці [10] до уваги фахівців, що експлуатують пристрої синхронної комутації та детермінують оптимальні моменти комутації БСК-110, репрезентовано елементи моделі та розрахунки режимів роботи високовольтного вимикача. Показано результати понад 100 віртуальних дослідів комп'ютерного моделювання в різних станах комутації. Зокрема, встановлено, що в околі точок 180; -18; 0; 18 електричних градусів за осцилограмою функції струму наявні повторні пробої міжконтактного проміжку, або, іншими словами, відбувається запалювання при від-

ключенні батареї статичних конденсаторів 110 кВ БСК-110 кВ. Відключення перед переходом функції струму через нуль викликає повторні пробої, а діапазони – 108; 0; 108 і 180 є неприпустимими за перенапругами.

На основі теоретичних і практичних даних у праці [11] було розроблено модель високовольтного вимикача 110 кВ, яка дає змогу описувати процес комутації батареї статичних конденсаторів 110 кВ з урахуванням повторних пробоеів і запалювання дуги, а також кидків струму.

У статті [4] описано метод відтворення фізичних процесів, які протікають в електромагнетному приводі вакуумного вимикача. До репрезентованої електричної схеми заміщення розглянуто задачу розрахунку магнетного поля системи складної конфігурації з подальшим розрахунком індуктивності. Розрахунок індуктивності здійснювали через енергію магнетостатичного поля в різні інтервали часу. Отримано розв'язок системи диференціальних рівнянь стану напруги та струму в колі, встановлено їх зв'язок із механічними процесами в системі.

Проаналізувавши доступні нам праці, в яких розроблено математичні моделі вимикачів, бачимо, що питання вивчення впливу механічних процесів у вимикачі на перехідні процеси в елементах електричних мереж є не повністю розкритим. Отже, виникає потреба в розробці математичної моделі вимикача, яка дозволила би враховувати згадані впливи.

Постановка завдання. Метою дослідження є побудова математичної моделі механізму переміщення контактів елегазового вимикача надвисокої напруги та з її використанням здійснення аналізу електромеханічних процесів у згаданому пристрої.

Виклад основного матеріалу. Якщо аналізувати механізми переміщення контактів елегазових вимикачів надвисокої напруги, то можна сказати, що найпоширенішими є кривошипно-шатунні механізми. Відомо, що кривошипно-шатунні механізми поділяються на центральні та зміщені. У досліджуваному вимикачі одна частина кривошипно-шатунного механізму є центральна, а інша – дезаксіальна, тому побудова математичної моделі такого механізму дещо ускладнюється.

На рис. 1 репрезентовано кінематичну схему механізму переміщення контактів вимикача. Модуль вимикача зазвичай має два розриви (дві пари контактів), тому кінематична схема, яка показана на рис. 1, – це симетрична половина всієї схеми.

Оскільки вони є повністю однакові, то немає потреби наводити другу її частину. Проаналізувавши кінематичну схему, бачимо, що потрібно встановити, як змінюватиметься величина Δy (відстань між контактами) залежно від спрацювання привідної пружини.

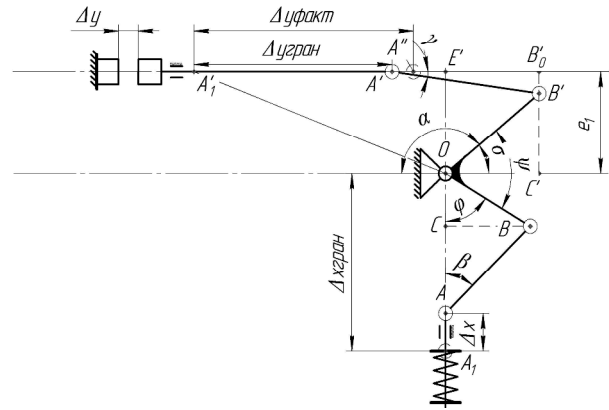


Рис. 1. Кінематична схема механізму переміщення контактів вимикача
Fig. 1. Kinematic diagram of the mechanism for moving the contacts of the circuit breaker

Запишемо вираз для знаходження відстані між контактами вимикача:

$$\Delta y = \Delta y_{\text{факт}} - \Delta y_{\text{гран}}, \quad (1)$$

де відстань $\Delta y_{\text{факт}}$ виникає після переміщення точки A' в точку A'' . У початкових умовах $\Delta y_{\text{факт}} = \Delta y_{\text{гран}}$; $\Delta y_{\text{гран}}$ – величина ходу контакту.

Запишемо вираз для пошуку $\Delta y_{\text{факт}}$ (див. рис. 1):

$$\Delta y_{\text{факт}} = E'A'_1 - E'A', \quad (2)$$

де

$$E'A'_1 = \sqrt{(OB' + B'A')^2 - e_1^2}, \quad (3)$$

$$E'A' = B'_0A' - B'_0E'. \quad (3)$$

За відомими правилами геометрії запишемо:

$$B'_0E' \equiv C'O = OB' \cos s, \quad B'_0A' = B'A' \cos g. \quad (4)$$

Підставивши вирази з (4) у другий вираз у (3) та після цього вирази з (3) у (2), отримаємо:

$$\Delta y_{\text{факт}} = \sqrt{(OB' + B'A')^2 - e_1^2} - [B'A' \cos g - OB' \cos s]. \quad (5)$$

Проаналізувавши вираз (5), бачимо, що в ньому є невідомі величини $\cos g$ та $\cos s$. Займемося пошуком цих величин згідно з рис. 1:

$$s = 180 - a, \quad a = 270 - (j + y) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow s = (j + y) - 90^\circ; \quad (6)$$

$$C'B' = OB' \sin S = e_1 - B'A' \sin g,$$

звідки

$$\sin g = \frac{OB' \sin S - e_1}{-B'A'} \quad (7)$$

Відповідно до тригонометричних формул другий вираз у (7) дорівнює:

$$\cos g = \sqrt{1 - \left[\frac{OB' \sin S - e_1}{-B'A'} \right]^2} \quad (8)$$

Підставивши третій вираз із (6) та вираз (8) у (5), отримаємо:

$$\Delta y_{\text{факт}} = \sqrt{(OB' + B'A')^2 - e_1^2} - \left[B'A' \sqrt{1 - \left[\frac{OB' \sin((j + \gamma) - 90^\circ) - e_1}{-B'A'} \right]^2} - OB' \cos((j + \gamma) - 90^\circ) \right] \quad (9)$$

Рівняння (9) дає змогу знаходити відстань між контактами вимикача, знаючи кут φ . Цілком зрозуміло, що кут φ має бути функцією від Δx . З рис. 1 випливає, що:

$$\Delta x = OA_1 - OA, \quad OA_1 = BO + BA, \quad OA = AC + CO, \\ AC = BA \cos b, \quad CO = BO \cos j \quad (10)$$

Врахувавши всі вирази в (10), можемо записати:

$$\Delta x = BO + BA - (BA \cos b + BO \cos j) \quad (11)$$

Для рис. 1 за правилами геометрії запишемо:

$$BC = BO \sin j = BA \sin b, \quad (12)$$

звідки

$$\sin b = \frac{BO}{BA} \sin j \quad (13)$$

Відповідно до тригонометричних формул вираз (13) перепишемо так:

$$\cos b = \sqrt{1 - \left[\frac{BO}{BA} \sin j \right]^2} \quad (14)$$

Підставивши вираз (14) в (11), отримаємо:

$$\Delta x = BO + BA - \left(BA \sqrt{1 - \left[\frac{BO}{BA} \sin j \right]^2} + BO \cos j \right) \quad (15)$$

У виразі (15) величину Δx можна знайти, використовуючи диференціальні рівняння, які описують роботу пружини. Ці рівняння одержано на основі модифікованого принципу Гамільтона – Остроградського на етапі отримання рівнянь механічного та електромагнетного стану досліджуваної системи.

Аналізуючи рівняння (9) та (15), бачимо, що якби можна було з цих рівнянь виразити кут φ та прирівняти ці вирази між собою, то задача була б

розв'язана. Оскільки цей кут неможливо виразити через наявність коренів квадратних, задача суттєво ускладнюється. Ми пропонуємо побудувати табличну функцію залежності $\Delta x(\varphi)$, після чого побудувати обернену функцію $\varphi(\Delta x)$ та апроксимувати її. Таким чином отримаємо вираз, який описує зміну кута φ залежно від Δx .

Механізм переміщення контактів має такі параметри: $OB = 0,165$ м, $BA = 0,143$ м, $OB' = 0,162$ м, $B'A' = 0,201$ м, $e_1 = 0,132$ м, $\gamma = 86,5^\circ$, $m = 5$ кг. Для репрезентованих параметрів у програмному комплексі *MathCad 15* було побудовано обернену функцію до виразу (14) (рис. 2), а в програмному засобі *Microsoft Excel* апроксимовано функцію $\varphi(\Delta x)$ з використанням поліноміальної залежності (рис. 3).

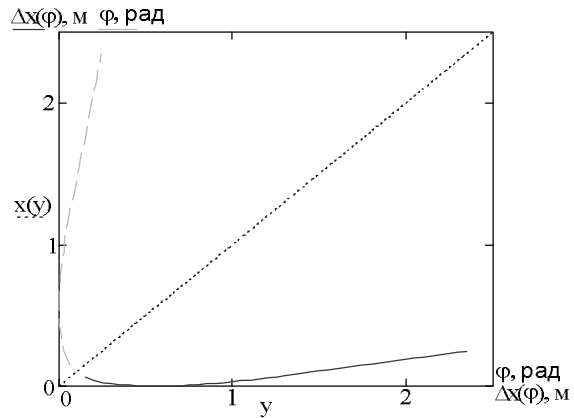


Рис. 2. Побудова оберненої функції в *MathCad 15*
Fig. 2. Construction of the inverse function in *MathCad 15*

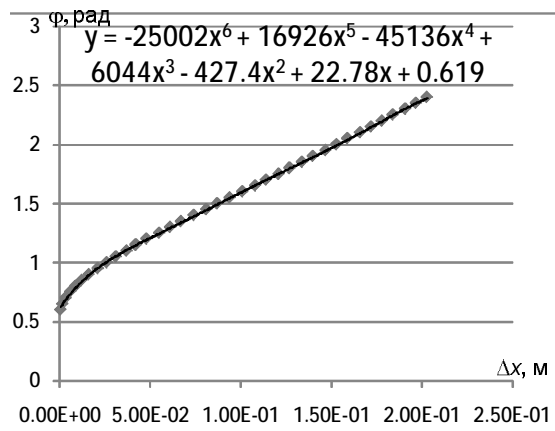


Рис. 3. Апроксимація таблично заданої функції у *Microsoft Excel*
Fig. 3. Approximation of the tabulated function in *Microsoft Excel*

Дослідження перехідних електромеханічних процесів здійснюємо для електротехнічної системи, представленої на рис. 4, за електричною схемою, яка запропонована в [5]. У згаданій праці лінію електропередачі розглядають у вигляді хвильового опору. Ми ж пропонуємо розглянути її у вигляді П-заступної схеми лінії електропередачі з еквівалентним активно-індуктивним навантаженням. Оскільки досліджуються симетричні перехідні режими, це дає підстави розглядати трифазну електричну мережу в однолінійному виконанні для параметрів прямої послідовності [2; 6] (див. рис. 4).

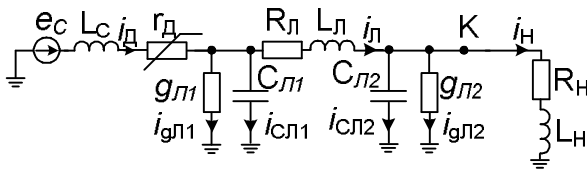


Рис. 4. Розрахункова схема фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії
Fig. 4. Schematic diagram of a fragment of an electrical energy transfer system

Електрична мережа отримує живлення від електроенергетичної системи, яка представлена фазною електрорушійною силою e_c та індуктивністю системи L_c . Вимикач у розрахунковій схемі електротехнічної системи пересилання енергії репрезентовано активним опором, характеристики якого залежать від відстані між контактами вимикача.

Цілком очевидно, що для забезпечення високої адекватності математичної моделі досліджуваного об'єкта потрібно якісно та правильно застосовувати фундаментальні фізичні закони, які ґрунтуються на теорії звичайних диференціальних рівнянь та диференціальних рівнянь з частинними похідними. Таким чином, побудова математичної моделі реального фізичного об'єкта зводиться до формування системи диференціальних рівнянь. Існує два основні підходи до формування моделей – класичний та варіаційний. Кожен із цих підходів, за словами Уайта й Вудсона [12], приводить до вірних результатів, якщо, зрозуміло, правильно їх застосовувати. Натомість шляхи, які ведуть до остаточної моделі, є різними, а отже, кожен зі згаданих підходів має свої вади й переваги. Відомо, що використання класичних підходів у деяких випадках може призвести до втрати певних прихованих рухів, а відтак до зниження адекватності самої математичної моделі. З іншого боку, варіаційний підхід дає змогу відносно вузькому спеціалісту розв'язувати задачі,

далекі від його кваліфікації. Іншими словами, застосування варіаційних підходів розширює коло можливих користувачів.

Найбільш вдалою математичною інтерпретацією варіаційних підходів є інтегральний варіаційний принцип Гамільтона – Остроградського, який нині успішно адаптований на системи як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами [13].

Для досліджуваної системи розширений функціонал дії за Гамільтоном – Остроградським та його варіація будуть мати такий вигляд [13]:

$$S = \int_0^t L^* dt, \quad dS = \int_0^t \left(\frac{\partial L^*}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_i} d\dot{q}_i \right) dt, \quad (16)$$

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

Розширена функція Лагранжа має такий вигляд [13]:

$$L^* = \dot{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (17)$$

де \dot{T}^* – кінетична коенергія, P^* – потенціальна енергія, Φ^* – енергія дисипації, D^* – енергія сторонніх непотенціальних сил.

Для досліджуваної електротехнічної системи з урахуванням механічних процесів запишемо елементи розширеної функції Лагранжа [3; 13]:

$$T^* = \frac{mV_x^2}{2} + \frac{L_c i_d^2}{2} + \frac{L_l i_l^2}{2} + \frac{L_H i_H^2}{2}; \quad (18)$$

$$P^* = \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{Q_{l1}^2}{2C_{l1}} + \frac{Q_{l2}^2}{2C_{l2}}; \quad (19)$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (k_d V_x^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (R_l i_l^2 + R_H i_H^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (r_d i_d^2) dt + \frac{1}{2} \int_0^t (g_{l1}^{-1} i_{g1}^2 + g_{l2}^{-1} i_{g2}^2) dt; \quad (20)$$

$$D^* = 4F_x \Delta x + \int_0^t e_c i_d dt, \quad (21)$$

де L_c , L_l , L_H – індуктивності системи, лінії та навантаження; R_l , R_H – активні опори лінії та навантаження; e_c – фазна електрорушійна сила системи; C_{l1} , C_{l2} – ємності лінії; Q_{l1} , Q_{l2} – електричні заряди ємностей C_{l1} , C_{l2} ; i_d , i_l , i_H – струм через вимикач, лінію та навантаження; g_{l1} , g_{l2} – активні провідності лінії; i_{g1} , i_{g2} – струми витоку лінії; r_d – опір 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 (вимикач складається з двох модулів, кожен модуль має по дві пари контактів, тому у формулі (20) перший доданок помножений на кількість пар контактів).

Далі представимо лише отримання рівнянь, які описують струм через вимикач, та рівняння руху пружини.

Відомо [13], що якщо взяти варіацію функціоналу (16) та прирівняти її до нуля, то після мінімізації функціоналу отримаємо рівняння Ейлера – Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L^*}{\partial q_k} = 0. \quad (22)$$

Введемо узагальнені координати для гономної системи, представленої на рис. 4, а також знайдемо відповідні їх узагальнені швидкості: $q_{(1)} = Q_C$ – заряд системи; $\dot{q}_{(1)} = \frac{dQ_C}{dt} = i_D$ – струм через вимикач.

Зауважимо, що в рівняння Ейлера – Лагранжа (22) підставляємо лише складники, які стосуються елемента, для якого будемо отримувати рівняння електромагнетного чи механічного стану, оскільки похідні по інших функціях (узагальнених координатах) тотожно рівні нулю, оскільки по останніх диференціювання не проводиться.

Запишемо рівняння Ейлера-Лагранжа (22) для вибраної узагальненої координати з урахуванням (18) – (21), враховуючи, що $\frac{\partial T^*}{\partial Q_C} = -u_{CЛ1}$ [13]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_k} \left(\frac{L_C i_D^2}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t (r_D i_D^2) d\tau - \int_0^t e_D i_D d\tau \right) - \frac{\partial T^*}{\partial q_1} = 0. \quad (23)$$

Змінюючи черговість диференціювання (23) та застосовуючи теорему про похідну інтеграла за верхньою межею, отримаємо рівняння екстремалей функціонала дії за Гамільтоном:

$$\frac{d}{dt} \left(L_C i_D + \int_0^t (r_D i_D) d\tau - \int_0^t e_C d\tau \right) - \frac{\partial T^*}{\partial Q_C} = 0; \quad (24)$$

$$L_C \frac{di_D}{dt} + r_D i_D - e_C + u_{CЛ1} = 0. \quad (25)$$

З рівняння (25) легко отримуємо перше рівняння у (28), репрезентуючи його в нормальній формі Коші.

Враховуючи, що пружина розглядається в одній системі з механізмом, запишемо узагальнені

координати та відповідні їм швидкості для двомасової системи: $q_{(2)} = x_k$ – поступальна координата руху зосередженої інерційної ланки;

$\dot{q}_{(2)} = \frac{dx_k}{dt} = V_{x_k}$ – швидкість поступального руху точки x_k ;

$q_{(3)} = x_{k+1}$ – поступальна координата руху

зосередженої інерційної ланки; $\dot{q}_{(3)} = \frac{dx_{k+1}}{dt} = V_{x_{k+1}}$ –

швидкість поступального руху точки x_{k+1} .

Враховуючи, що $\Delta x = q_3 - q_2$, $V_x = \Delta V = \dot{q}_3 - \dot{q}_2$,

запишемо:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial V_x} \left(\frac{mV_x^2}{2} - \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t (k_d V_x^2) d\tau - 4F_x \Delta x \right) - \frac{\partial}{\partial \Delta x} \left(\frac{mV_x^2}{2} - \frac{k(\Delta x)^2}{2} + \frac{1}{2} \int_0^t (k_d V_x^2) d\tau - 4F_x \Delta x \right) = 0, \quad (26)$$

звідки

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(mV_x + \int_0^t (k_d V_x) d\tau \right) + k(\Delta x) + 4F_x = 0 \Rightarrow \\ & \Rightarrow m \frac{dV_x}{dt} + k_d V_x (-1) + k(\Delta x)(-1) + 4F_x (-1) = 0. \quad (27) \end{aligned}$$

З рівняння (27) отримуємо друге рівняння в (32).

Перше рівняння в (32) отримуємо з означення швидкості узагальненої координати.

Детальніше ознайомитися з одержанням рівнянь стану систем подібного характеру на основі варіаційних підходів можна у працях [14; 17; 18].

$$\begin{aligned} \frac{di_D}{dt} &= \frac{1}{L_C} (e_C - r_D i_D - u_{CЛ1}), \\ \frac{du_{CЛ1}}{dt} &= \frac{1}{C_{Л1}} (i_D - i_{Л1} - i_{гЛ1}); \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{di_{Л1}}{dt} = \frac{1}{L_{Л1}} (u_{CЛ1} - R_{Л1} i_{Л1} - u_{CЛ2}); \quad (29)$$

$$\frac{du_{CЛ2}}{dt} = \frac{1}{C_{Л2}} (i_{Л1} - i_{гЛ2} - i_H),$$

$$\frac{di_H}{dt} = \frac{1}{L_H} (u_{CЛ2} - R_H i_H); \quad (30)$$

$$i_{гЛ1} = g_{Л1} u_{CЛ1}, \quad i_{гЛ2} = g_{Л2} u_{CЛ2}; \quad (31)$$

$$\frac{d\Delta x}{dt} = V_x, \quad \frac{dV_x}{dt} = \frac{k\Delta x + 4F_x + k_d V_x}{m}, \quad (32)$$

де $u_{CЛ1}$, $u_{CЛ2}$ – напруги відповідно на початку та в кінці лінії.

Значимо, що врахування дугових процесів під час комутації у вимикачі надвисокої напруги є надзвичайно складною задачею, тому ми врахо-

вемо їх у першому наближенні за допомогою активного опору з нелінійною характеристикою, опираючись на працю [20], в якій сказано про внутрішню енергію стовпа дуги, що однозначно пов'язана з його електричним опором експоненціальною залежністю. Усі стани стовпа дуги з однією і тією ж внутрішньою енергією електрично ідентичні, оскільки електричне коло реагує лише на опір. Також цю теорію підтримано і в праці [5], де автори додатково стверджують, що в схемах заміщення електричних мереж дугогасильні пристрої елегазових вимикачів можна враховувати еквівалентним нелінійним активним опором міжконтактного проміжку.

Характеристику міжконтактного проміжку описуємо поліномом п'ятого порядку. Ця характеристика себе добре зарекомендувала під час дослідження перехідних процесів у електротехнічній системі пересилання енергії в режимі автоматичного повторного ввімкнення [16]. Згадана залежність була підібрана з урахуванням рекомендацій міжнародної електротехнічної комісії [19], ця залежність має спочатку повільно зростаючий характер (моделює горіння дуги), а при розходженні контактів – різко зростаючий нелінійний характер (моделює згасання дуги):

$$r_D = 2 \cdot 10^{12} \Delta y^5 - 2 \cdot 10^{11} \Delta y^4 + 9 \cdot 10^9 \Delta y^3 - 10^8 \Delta y^2 + 10^6 \Delta y + 2. \quad (33)$$

На підґрунті розробленої математичної моделі було написано програмний код алгоритмічною мовою *Visual Fortran* та здійснено комп'ютерне моделювання електромеханічних процесів у вимикачі.

На рис. 5 показано графічну залежність зміни відстані між контактами вимикача в часі. Варто зазначити, що відстань між контактами змінюється за певним законом. Експериментальне отримання цієї залежності неможливе через велику вартість вимикача та неможливість здійснення експериментальних досліджень.

На рис. 6 та 7 репрезентовано графіки перехідних процесів струму через вимикач та напруги між контактами вимикача відповідно.

Якщо аналізувати одночасно рис. 5, 6 та 7, бачимо, що зі збільшенням відстані між контактами зменшується струм та виникають перенапруги між контактами вимикача, після чого напруга виходить в усталений режим. Варто зазначити, що під час розмикання напруга між контактами збільшується удвічі.

Отримані результати комп'ютерної симуляції підтверджуються теоретичними положеннями класичної електродинаміки [1; 15] та класикою

відмикання струмів в електротехнічних системах пересилання енергії високої напруги [7; 9].

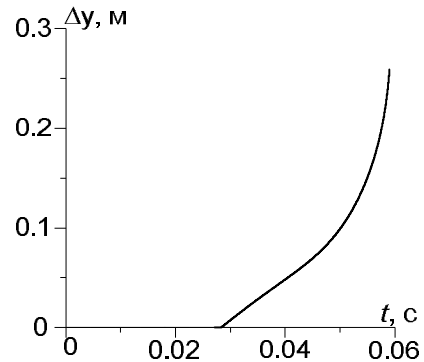


Рис. 5. Графічна залежність зміни відстані контактів у часі

Fig. 5. Graphic dependence of the change in the distance of contacts in time

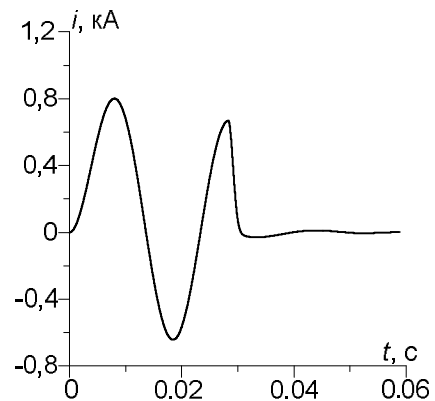


Рис. 6. Перехідний процес струму через вимикач

Fig. 6. Transient processes current through the circuit breaker

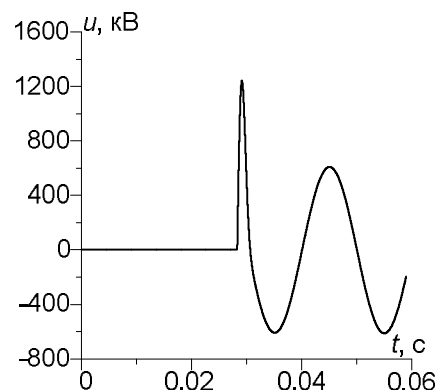


Рис. 7. Перехідний процес напруги між контактами вимикача

Fig. 7. Transient processes voltage between circuit breaker contacts

Висновки. 1. Застосування апарату міждисциплінарного моделювання, який ґрунтується на модифікованому принципі Гамільтона – Остроградського, під час аналізу динамічних систем, що описуються науками різної природи (у нашому випадку електротехніки й прикладної механіки), дає змогу будувати математичні моделі цих систем суто з єдиного енергетичного підходу, чим істотно розширює можливості евентуального користувача.

2. Використання математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача дає змогу за допомогою останнього враховувати реальні комутаційні процеси в елементах електротехнічних систем, оскільки в електричних мережах згадані процеси відбуваються не обов'язково під час проходження функції струму через нуль.

3. Якщо досліджувати відомими методами перехідні процеси в елементах електротехнічних систем пересилання енергії, коли досліджувані функціональні залежності зазнають розривів першого роду, то це неодмінно потребує пошуку початкових умов комутації, що для подібного типу схем є надзвичайно складною й об'ємною задачею. Тим паче, коли в системі працюють декілька вимикачів з різними параметрами.

Бібліографічний список

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. шк., 1973. 658 с.
2. Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. Н., Перхач В. С. Электрические системы и сети. Киев: Вища шк., 1986. 584 с.
3. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Москва: Мир, 1987. 536 с.
4. Васильева О. В. Моделирование электромагнитного привода вакуумного выключателя. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 3. С. 55–62.
5. Вишневикий Ю. И. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2002. 728 с.
6. Ершевич В. В., Зейлингер А. Н., Илларионов Г. А. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.
7. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1963. 438 с.
8. Левонюк В. Р. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних процесів в елементах електроенергетичних систем. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 155–161.
9. Рагаллер К. Отключение токов в сетях высокого напряжения. Москва: Энергоиздат, 1981. 523 с.
10. Тихончук Д. А. Моделирование режимов работы высоковольтного выключателя. *Главный энергетик*. 2014. № 4. С. 59–64.
11. Тихончук Д. А. Коммутация батареи статических конденсаторов высокого напряжения выключателем с одним приводом: дисс. ... канд. техн. наук. УФА, 2014. 232 с.
12. Уайд Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Ленинград: Энергия, 1964. 539 с.
13. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
14. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
15. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва: Мир, 1964. 785 с.
16. Czaban A., Szafraniec A., Lis M., Levoniuk V., Lysiak H., Figura R. Transient processes analysis in a part of a power grid during a automatic reclosing cycle. *Control of Power Systems 2018: proceedings of the 13th International Scientific Conference (Tatranské Matliare, 2018)*. Tatranské Matliare, 2018. P. 43–48.
17. Czaban A., Lis M., Sosnowski J., Lewoniuk W. Model matematyczny dwuprzewoj linii zasilania z wykorzystaniem modyfikowanej zasady Hamiltona. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*. 2016. Nr 1. P. 31–36.
18. Czaban A., Lis M., Chrzan M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters. *Przegląd elektrotechniczny*. 2018. № 1. P. 17–20.
19. IEC 62271-102. International standart. High-voltage switchgear and controlgear. Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. First edition 2001-12.
20. Mayr O. Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*. 1943'37. Heft 12. S. 588–608.

Левонюк В., Чабан Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИМИКАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

У праці здійснено аналіз наукових публікацій, які стосуються дослідження електромеханічних перехідних процесів у вимикачах високої та надвисокої напруги. Аналіз показав, що здебільшого дослідження комутаційних перехідних процесів в електротехнічних системах пересилання енергії здійснюються без урахування впливу на них електромеханічних процесів під час роботи механізмів переміщення контактів вимикачів, незважаючи на те, що швидкість їх перебігу співмірна зі швидкістю перебігу електро-

магнетних процесів. Здійснено постановку проблеми, сформульовано мету та обґрунтовано науково-практичну потребу створення ефективних, достатньо адекватних і відносно простих моделей вимикачів для дослідження комутаційних процесів в електротехнічних системах пересилання енергії. У роботі основний акцент поставлено на розробку математичної моделі механізму переміщення контактів вимикача, а дугові процеси, згідно з теорією Майра, зеквівалентовано активним опором, який змінюється за експоненціальним законом залежно від відстані між контактами. Математичну модель механізму переміщення контактів вимикача надвисокої напруги побудовано на основі підходів аналітичної механіки. Розроблену математичну модель вимикача інтегровано у фрагмент електротехнічної системи пересилання енергії. На основі узагальненого міждисциплінарного (інтердисциплінарного) методу математичного моделювання, який ґрунтується на модифікації інтегрального варіаційного принципу Гамільтона – Остроградського, одержано рівняння електромагнетного та електромеханічного стану досліджуваної системи. Представлено результати комп'ютерної симуляції часового розподілу функціональних залежностей струму через вимикач, напруги між контактами вимикача та переміщення контактів у вигляді рисунків, що аналізуються. Підтверджено, що розвиток міждисциплінарних методів дослідження дає змогу, виходячи з єдиного енергетичного підходу, будувати ефективні та адекватні математичні моделі динамічних систем різної фізичної природи, що істотно розширює дослідницькі можливості евентуального користувача.

Ключові слова: математична модель, перехідні процеси, вимикач, електромеханічні процеси, надвисока напруга.

Levoniuk V., Chaban G.

RESEARCH OF ELECTRICAL MECHANICAL PROCESSES IN CIRCUIT BREAKER ULTRA-HIGH VOLTAGE

The paper analyzes scientific publications, which showed that in most cases, the study of electromagnetic transients processes in electrotechnical systems of energy transmission is carried out without taking into account the influence of electromechanical processes on them during the operation of the mechanisms of switching the contacts of the circuit breaker, despite the fact that their velocity is commensurate with the speed leakage of electromagnetic processes. It is also shown that the switching is limited to a high voltage class. The scientific and practical necessity of constructing effective and relatively simple models of switching devices for the study of switching processes in electrotechnical systems of energy transmission is substantiated. Based on the approaches of analytical mechanics, a mathematical model of the mechanism for moving the contacts of the circuit breaker is constructed, arc processes are equivalently nonlinear active resistance, which has an exponential characteristic, which in turn depends on the distance between the contacts. On the basis of the generalized interdisciplinary (interdisciplinary) method of mathematical modeling, which is based on modifications of the Hamilton–Ostrogradsky integral variational principle, a mathematical model of a fragment of the electrical energy transfer system is constructed into which the developed model of the super-high voltage circuit breaker is integrated. This model makes it possible to analyze transient electromagnetic processes in the elements of the investigated electrotechnical system, electromechanical transient processes in the circuit breaker and their mutual influence. This makes it possible to investigate the real transients processes in the elements of the electrical system without a complicated procedure for finding the initial switching conditions.

In addition, the article presents the results of computer simulation of short-circuit current shutdown in the electrical power transfer system, which fully confirmed the correctness and adequacy of the research carried out in the article.

It is confirmed that the development of interdisciplinary research methods makes it possible, based on the unified energy approach, to build effective and adequate mathematical models of dynamic systems of various physical nature, which significantly expands the research capabilities of the eventual user.

Key words: mathematical model, transient processes, circuit breaker, electromechanical processes, ultra-high voltage.

Стаття надійшла 03.11.2018