

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ СТАНУ ПРОВОДУ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

*Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, Україна

Анотація. У статті представлено комплексну модель стану проводу лінії електропередачі 0,4–35 кВ для дослідження впливу на величину витрат електричної енергії, терміну та умов його експлуатації. Запропоновано методика визначення параметрів моделі. Визначені подальші напрями дослідження.

Ключові слова: математична модель, витрати електричної енергії, механічні характеристики проводу, умови експлуатації.

Аннотация. В статье представлена комплексная модель состояния провода линии электропередач 0,4–35 кВ для исследования влияния на величину расхода электрической энергии, его срока и условий эксплуатации. Предложена методика определения параметров модели. Определены дальнейшие направления исследования.

Ключевые слова: математическая модель, расход электрической энергии, механические характеристики провода, условия эксплуатации.

Abstract. The article presents an integrated model of wire state of power lines 0,4–35 kV to investigate the effect on the amount of power losses of its term and operating conditions. The methodology for determining parameters of the model is offered. Further objectives of the study are identified.

Keywords: mathematic model, power losses, mechanical properties of the wire, operating condition.

1. Вступ

В останні роки, внаслідок реорганізації енергетичної галузі в Україні, спостерігається тенденція до зменшення інвестицій в інженерну інфраструктуру енергетичних компаній. Разом з тим відбувається старіння основних фондів підприємств, що забезпечують передачу електричної енергії від об'єктів виробництва до кінцевих споживачів за активної розбудови приватного та дрібного виробничого сектора, що, у свою чергу, збільшує навантаження на розподільні мережі. Враховуючи фінансовий фактор, більш ефективним інструментом для енергокомпаній на сьогоднішній день є облік, контроль і нормування величини технологічних витрат електричної енергії. Оскільки найбільшу частку у загальній величині складають витрати електричної енергії у проводах ліній електропередач (ЛЕП), детальної уваги потребує дослідження впливу на характеристики проводу та зв'язану з ними величину технологічних витрат електричної енергії (ТВЕ), терміну експлуатації проводів та зовнішніх чинників, що діють на провід у процесі експлуатації [5]. На сьогодні існують як математичні моделі окремих явищ, що виникають у проводах, так і потужні програмні інструменти моделювання стану проводів ЛЕП (створені для мереж класу 110кВ і вище), але в них враховано не всі фактори, що призводять до зміни характеристик проводу та величини ТВЕ як кінцевого результату експлуатації проводів ЛЕП. Враховуючи найбільшу масову частку в електричних мережах розподільних ЛЕП класу напруги 0,38–35кВ, їх розгалуженість та найбільш незадовільний технічний стан [6], вбачається доцільним створення комплексної моделі стану проводу у прогоні ЛЕП (далі модель), яка б враховувала сумарний вплив на провід у частині зміни геометрії поперечного перерізу та лінійних розмірів, зовнішніх чинників та струмових навантажень, а також зміни механічних характеристик внаслідок впливу процесів, пов'язаних зі старінням та повзучістю матеріалу провідника.

2. Структура та взаємодія складових моделі стану проводу

Модель у собі містить такі складові:

1. Механічна складова.
 - 1.1. Базова складова механічного стану.
 - 1.2. Складова повзучості.
 - 1.3. Складова старіння.
2. Електромагнітна (електрична) складова.
3. Температурна складова.
4. Складова корозії поверхні проводу.

Механічна складова моделі визначає розрахунок механічних напружень у проводі на основі рівняння стану проводу, виходячи із зовнішніх навантажень на провід, з урахуванням релаксації напружень під впливом повзучості проводу та зміни фізико-механічних констант під впливом старіння.

Електромагнітна (електрична) складова стану проводу визначає розрахунок активного опору з урахуванням поверхневого ефекту та ефекту близькості з розрахунком активного опору через питомий [3].

Температурна складова чисельно характеризує залежність температури поверхні проводу від зовнішніх факторів та струмових навантажень [2].

Незворотні процеси, пов'язані зі зменшенням поперечного перерізу внаслідок процесів електрохімічної корозії, враховані шляхом уведення складової моделі, що характеризує корозію матеріалу [4].

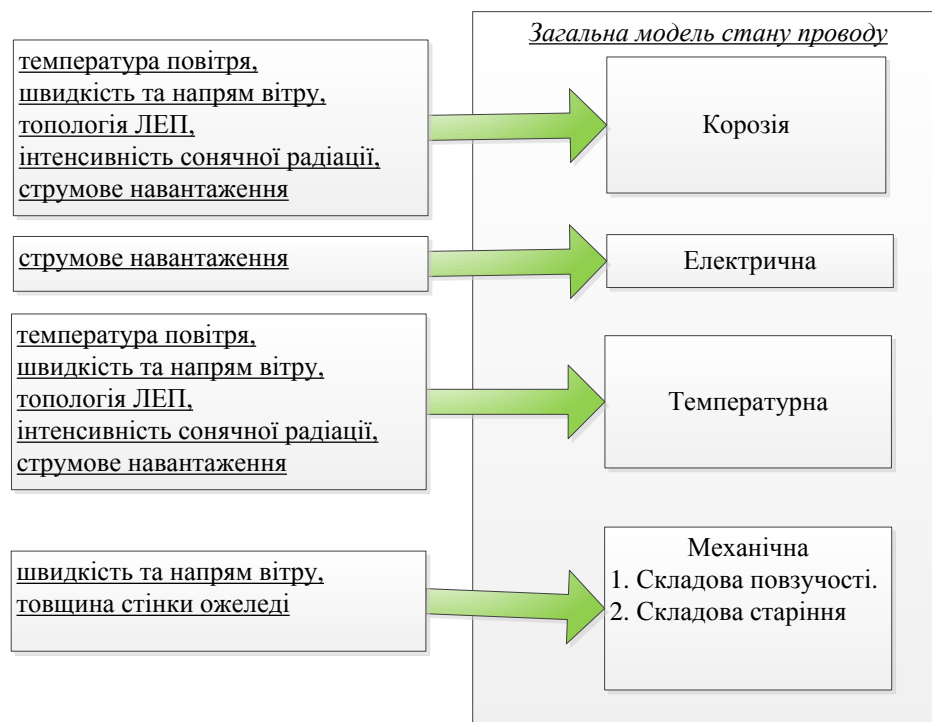


Рис. 1. Вплив змінних вхідних параметрів на складові моделі

Структура вхідних даних для моделі наведена на рис. 1. Крім того, в розрахунках використані такі величини:

- марка та поперечний переріз проводу (сталевий та алюмінієвий частин);
- питома вага проводу;
- діаметр проволок, діаметр повиву, кількість проволок та число повивів;
- довжина прогону, початкова стріла провисання, географічне розташування ЛЕП;

– проміжок часу, на якому відбувається моделювання;
 – початкове значення фізичних констант матеріалу проводу (модуль Юнга, температурний коефіцієнт лінійного розширення, температурний коефіцієнт опору, коефіцієнти, пов'язані з розрахунком теплової рівноваги).

Розрахунок механічних напружень та довжини проводу у прогоні виконано з використанням рівняння стану проводу [1], яке, в загальному випадку, має вигляд

$$\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(\theta - \theta_0), \quad (1)$$

де σ_0, σ – напруження у проводі на початку та в кінці часового інтервалу, даН/мм²;

γ_0, γ – питоме зовнішнє механічне навантаження на провід на початку та в кінці часового інтервалу, даН/м мм²;

l – довжина прогону, м;

E – модуль пружності, даН/мм²;

α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу проводу, 1/С⁰;

θ_0, θ – температура проводу на початку та в кінці часового інтервалу, С⁰.

Довжина проводу у прогоні визначається рівнянням [1]

$$L = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2}. \quad (2)$$

Повзучість проводу (деформація в часі у результаті постійних дій зовнішніх навантажень) пропонується оцінювати за такими залежностями [3]:

для сталюого осердя проводу:

$$\Delta l_c(st) = 7 \cdot 10^{-18} \cdot e^{0,02(\theta-20)} \cdot \sigma_{st}^{4,7} \cdot t^{0,13} (M/M); \quad (3)$$

для алюмінієвої частини проводу:

$$\Delta l_c(al) = 9 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,03(\theta-20)} \cdot \sigma_{al}^{1,3} \cdot t^{0,2} (M/M), \quad (4)$$

де θ – температура проводу в часовому інтервалі, С⁰;

σ_{al}, σ_{cm} – напруження у проводі (сталі та алюмінію відповідно) на початку та в кінці часового інтервалу, даН/мм²;

t – інтервал часу з умовно постійними параметрами (напружень та температури).

Оскільки кріплення проводу є жорстким в анкерному прогоні ЛЕП, то і сумарна деформація повзучості є однаковою як для сталюого осердя, так і для алюмінієвої частини проводу [3].

Пружна та непружна деформації за заданий проміжок часу (аналогічний проміжку визначення пружної деформації) додаються. Потім розраховуються кінцеві напруження у проводі з урахуванням «релаксації» внаслідок повзучості.

Також під впливом як температурних, так і механічних напружень, у проводі виникають явища, пов'язані зі старінням матеріалу та зміною його фізико-механічних параметрів (модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона, величини граничних напружень та характеристик міцності). Тому додаткового уточнення потребують і фізико-механічні параметри, що входять до рівняння стану проводу.

Розрахунок температури поверхні проводу виконується на основі рівняння теплового балансу проводу [2]:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 r(\theta), \quad (5)$$

де q_c – кількість тепла, відведена від проводу конвекцією;
 q_r – кількість тепла, відведена від проводу випромінюванням;
 q_s – кількість тепла, надана проводу сонячною радіацією;
 $r(\theta)$ – опір провідника (активний) як функція від температури проводу θ .

Вихідною величиною розрахунку є температура поверхні проводу.

У результаті дії на провід зовнішніх факторів виникають незворотні процеси, пов'язані зі зміною діаметра проводу (корозія). В загальному випадку процес корозії описується таким рівнянням [5]:

$$\Delta d = d_0 - \Delta d_0 T_k, \quad (6)$$

де d_0 – початковий діаметр проводу, мм;

Δd_0 – зменшення діаметра алюмінієвої жили проводу, мм/рік;

T_k – проміжок часу, впродовж якого відбувається корозія, років.

Процеси корозії протікають у проводі під впливом атмосферних факторів і враховуються застосуванням різних коефіцієнтів Δd_0 , залежність яких від зовнішніх факторів також потребує ретельного дослідження.

Електрична складова моделі проводу містить у собі розрахунок активного опору з урахуванням поверхневого ефекту та ефекту близькості. В ній також відбувається коригування величини активного опору з урахуванням температури проводу та зменшення поперечних розмірів провідника за формулами виду (7) [3].

$$R = \frac{4\rho_{20} \cdot (1 + \alpha(t - 20)) \cdot k_m f(A)}{\pi \cdot d^2}, \quad (7)$$

де ρ_{20} – питомий опір матеріалу при температурі 20°C , Ом м;

d – діаметр проводу, м;

t – температура поверхні проводу, $^\circ\text{C}$;

$k_m f(A)$ – коефіцієнт, що враховує поверхневий ефект та ефект близькості як функцію від щільності струму.

Комплексна модель містить у собі змінні, які є спільними для всіх складових моделі та одночасно є вхідними для однієї зі складових та вихідними для іншої, тобто чисельні розрахунки потрібно проводити шляхом розв'язання рівнянь (1)–(7) з уточненням вихідних величин між складовими моделі.

Таблиця 1. Перелік взаємопов'язаних змінних

Змінна	Складова моделі			
	Механічна	Електрична	Температурна	Модель корозії
Діаметр проводу	вихідна	вхідна	вхідна	вихідна
Температура поверхні проводу	вхідна	вхідна	вихідна	вхідна

Структура зв'язків між складовими моделі наведена на рис. 2.

З урахуванням того, що фізичні процеси у проводі, в тому числі і деформація, мають адитивний характер, моделювання режиму проводу відбувається ітераційним шляхом. Вхідні параметри на початку моделювання (перша ітерація) формують температуру поверхні проводу. Згідно з нею уточнюється величина активного опору, яка входить як до температурної, так і до електромагнітної складової. Це досягається шляхом розв'язання сис-

теми рівнянь, що включає в себе рівняння (5) температурного стану проводу та рівняння (7) визначення опору проводу на основі температурного коефіцієнта опору, питомого опору матеріалу, початкових геометричних розмірів, коригуючих коефіцієнтів поверхневого ефекту та магнітних втрат.

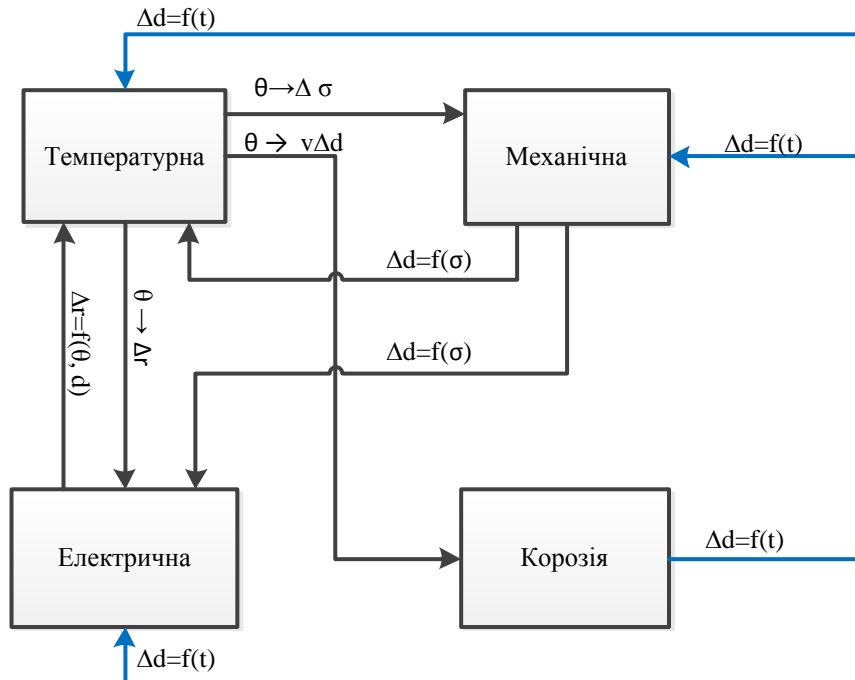


Рис. 2. Структурна схема зв'язаних внутрішніх змінних

Температура проводу передається в механічну складову, де у відповідності з нею та зовнішніми навантаженнями на провід відбуваються розрахунок механічних напружень та зміни геометрії проводу шляхом розв'язання рівнянь (1)–(4) з урахуванням релаксації напружень внаслідок повзучості.

Також температура поверхні проводу передається до складової корозії, яка вносить зміни до величини поперечного перерізу.

Кінцеві, для прийнятого інтервалу часу, розраховані значення температури та діаметра проводу, з урахуванням зменшення його величини внаслідок корозії, приймаються початковими для наступного інтервалу часу.

3. Висновки

Представлено комплексну модель стану проводу лінії електропередач, що враховує вплив природно-кліматичних факторів, режимних параметрів, терміну експлуатації на геометричні та електричні параметри проводу. Запропоновано методику визначення параметрів моделі.

Подальші зусилля будуть спрямовані на дослідження в галузі впливу поверхневого ефекту, зміни фізико-механічних констант матеріалу проводу під впливом зовнішніх чинників та визначення величини інтервалу часу для усереднення дії на провід факторів, які мають змінний у часі характер.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крюков К.П. Конструкции и механический расчет линии электропередачи / К.П. Крюков, Б.П. Новгородцев. – [2-изд. перераб. и доп.]. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1979. – 312 с.

2. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. IEEE Standard. Approved 16.11.2006. – New York: IEEE-SA Standards Board, 2006. – 69 p.
3. Klipovic-Gledja V. A unified model for predicting the electrical mechanical and thermal characteristics of stranded overhead-line conductors [Електронний ресурс] / V. Klipovic-Gledja, V.T. Morgan and R.D. Findlay. – Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=405632&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel2%2F3218%2F9123%2F00405632.pdf%3Farnumber%3D405632>.
4. Шкрабец Ф.П. Влияние коррозии алюминия на электрические параметры ЛЭП / Ф.П. Шкрабец, П.Ю. Красовский // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 79. – С. 36 – 39.
5. Галюга А.В. Щодо уточнення розрахунку технологічних витрат електричної енергії / А.В. Галюга, А.Л. Приступа // Зб. матеріалів наук.-техн. конф.: тез. конф. «Фізика, електроніка, електротехніка». – Суми, 2014. – 182 с.
6. Галюга А.В. Оцінювання діючих методик розрахунку технологічних витрат електричної енергії в розподільних електричних мережах / А.В. Галюга, А.Л. Приступа // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – (Серія "Технічні науки"). – 2015. – № 1 (77). – С. 159 – 165.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2015