

1. *Voblikov E.* Technology elevator industry: Textbook. - St. Petersburg.: Publisher "Lan", 2010. – 384p. (Rus.)
2. *Malin N.* Grain storage technology. - M.: ColossS, 2005. – 278 p. (Rus.)
3. *Malin N.* Energy-efficient drying grain. - K.: ColossS, 2004. – 240p. (Rus.)
4. *Danilov O.* Saving energy when heat drying / O. Danilov, B. Leonchik. - Energoatomizdat, 1986. – 136p. (Rus.)
5. *Rey D.* Energy savings in industry. Handbook for engineers and technical workers. - Energoizdat, 1983 - 208 p. (Rus.)
6. *Yantovsky E., Levin L.* Industrial heat pumps. - Energoizdat, 1989 - 128p. (Rus.)
7. *Lykov A.* Theory of drying. - Moscow: Energiya, 1968 - 472p. (Rus.)
8. *Bezrodny M., Vovk V.* The thermodynamic efficiency of heat pump conveyor installation for drying grain / M. Bezrodnyi, V. Vovk // R & D journals "Science news NTU" KPI "" - 2014. - № 2.

УДК 621.577

М.К. Безродный, д-р техн. наук, профессор; В.В. Вовк

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОНАСОСНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ  
СУШИЛКИ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ВЫСУШЕННОГО ЗЕРНА**

*Приведена математическая модель и результаты термодинамического анализа теплонасосной рециркуляционной конвейерной сушилки с утилизацией теплоты высушенного зерна. Целью работы является анализ качественного влияния модуля утилизации теплоты высушенного зерна на энергетическую эффективность теплонасосной сушилки зерна, разработка математической модели для расчета коэффициента использования энергии. Результаты численного расчета по сформулированной математической модели указывают на энергетическое преимущество теплонасосной сушилки с модулем утилизации теплоты. Моделирование процессов проведено для первого периода сушения с постоянной интенсивностью удаления влаги из зерна пшеницы. Сделаны выводы относительно эффективности использования модуля утилизации теплоты высушенного зерна. Также получены количественные характеристики коэффициента использования внешней энергии на испарение влаги.*

**Ключевые слова:** тепловой насос, сушки зерна, рециркуляция, утилизация теплоты, сушение зерна.

Надійшла 12.11.2013

Received 12.11.2013

УДК 621.316.1.017

В.В. Зорін, д-р. техн. наук, професор, О.М. Майстренко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПО РЯДУ  
КРИТЕРІЇВ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРУГОЮ  
6-10 КВ**

*Наведено науково-технічне обґрунтування технічних заходів щодо підвищення пропускної здатності існуючих кабельних ліній по ряду критеріїв (нагріву, втратах потужності, режиму напруги, недовідпуску електроенергії) в умовах фізичної та моральної зношеності електричних мереж України, зміни структури електроспоживання та прогнозованого поступового зростання обсягів споживання електричної енергії усіма групами споживачів, особливо в житловому секторі (що зумовлено розвитком новітніх технологій та ростом інноваційного попиту). Запропоновані математичні моделі і проведені розрахунки показали, що заміна перерізу на більший дозволяє підвищити пропускну спроможність кабельних ліній до 25% при заміні на одну ступінь та 50% при заміні на дві ступені.*

**Ключові слова:** пропускна здатність кабельних ліній, переріз кабелів, режим роботи, втрати потужності, опір.

**Вступ**

В умовах фізичної та моральної зношеності електричних мереж, зміни структури електроспоживання та прогнозованого поступового росту обсягів споживання електричної енергії, актуальною стає проблема підвищення пропускної здатності ліній розподільних електричних мереж. В статті [1] розглянуті питання по підвищенню пропускної здатності повітряних ліній електропередач, а для існуючих кабельних ліній пропонуємо такі заходи підвищення пропускної здатності: заміна існуючого перерізу на новий на одну стандартну ступень і на дві, розділення кабельної лінії на частини та спорудження нової ділянки.

**1. Підвищення пропускної здатності за рядом критеріїв шляхом заміни існуючого перерізу кабельної лінії  $F_1$  на новий  $F_2$  на одну стандартну ступень  $n = 1$  і на дві  $n = 2$ .**

1.1.3а умовами нагрівання.

Під час перевірки перерізів жил кабелів напругою до 35 кВ за нагрівом слід користуватися главою 1.3 ПУЕ. Правила улаштування електроустановок вимагають, щоб провідники будь-якого призначення задовольняли вимогам гранично допустимого нагріву з урахуванням не тільки нормальних, а й після аварійних режимів. Під час перевірки за нагрівом приймається півгодинний максимум струму, який протікає даним елементом мережі. Гранично допустима температура для кабелів з паперовою просоченою ізоляцією на напругу 10 кВ складає  $60^\circ\text{C}$  [2].

За умовами нагрівання допустимий струм  $I_{o1}$  при перерізі  $F_1$  гранична пропускна здатність за активною потужністю складає:

$$P_1 = \sqrt{3}UI_{o1} \cos \varphi \quad (1)$$

Також при заміні на переріз  $F_2$ , де  $F_2 > F_1$  маємо:

$$P_2 = \sqrt{3}UI_{o2} \cos \varphi \quad (2)$$

Збільшення пропускної здатності  $\delta P$  при заміні перерізу  $F_1$  на  $F_2$  складає:

$$\delta P = P_2 - P_1 = \sqrt{3}U \cos \varphi (I_{o2} - I_{o1}) \frac{P_1}{\sqrt{3}U \cos \varphi I_{o1}} = P_1 \left( \frac{I_{o2}}{I_{o1}} - 1 \right) \quad (3)$$

Розглянемо випадок для заміни існуючої кабельної лінії ААШв-10 перерізу  $50 \text{ мм}^2$  на нову перерізом  $70 \text{ мм}^2$  ААБл-10:

-  $n = 1$

$$F_1 = 50, F_2 = 70, I_{o1} = 105\text{A}, I_{o2} = 130\text{A}.$$

$$\delta P = P_1 \left( \frac{130}{105} - 1 \right) = 0,238.$$

При заміні перерізу на одну ступінь отримуємо збільшення пропускної здатності на 23,8%.

-  $n = 2$

$$F_1 = 50, F_2 = 95, I_{o1} = 105\text{A}, I_{o2} = 155\text{A}.$$

$$\delta P = P_1 \left( \frac{155}{105} - 1 \right) = 0,476.$$

При заміні перерізу на дві ступені отримуємо збільшення пропускної здатності на 47,6%.

Отримані результати занесемо в таблицю 2 та таблицю 3.

**1.2 За умовами режиму напруги**

Режим напруги у всіх точках розподільної мережі безпосередньо залежить від закону регулювання напруги на шинах ЦП. Напруга на затискачах електроприймача для будь-якого моменту часу визначається величиною напруги на шинах ЦП, сумарною величиною втрати напруги від ЦП до приймача і прийнятим відгалуженням первинної обмотки розподільного трансформатора [3].

Ефективність регулювання напруги в електричних розподільних мережах полягає не лише в підтриманні відхилень напруги в допустимих межах відповідно нормам ГОСТ 13109-97, але й в раціональному витрачанні електроенергії. При такій постановці задачі слід враховувати економічні характеристики споживачів електричної енергії в залежності від величини підведеної напруги на зажимах його електроприймачів, тобто враховувати статичні характеристики навантаження по напрузі. Для різних видів навантаження, їх поєднання та особливостей технологічного процесу ці залежності будуть різні та можуть мати як лінійний, так і нелінійний характер. Вони називаються регулюючим ефектом навантаження, який показує зміну споживаючої потужності електроприймача в відсотках при зміні напруги на 1% [4].

Оцінимо збільшення пропускної здатності кабельної лінії за активною потужністю при заміні перерізу  $F_1$  на  $F_2$  за умовами режиму напруги, коли втрати напруги  $\Delta U$  в лінії до та після заміни перерізу залишаються постійні  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ .

$$\text{При перерізі } F_1 \quad \Delta U_1 = \sqrt{3}I_1(r_1 \cos \varphi + x_1 \sin \varphi), \quad (4)$$

$$\text{при перерізі } F_2 \quad \Delta U_2 = \sqrt{3}I_2(r_2 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi). \quad (5)$$

Прирівнявши ці два вирази і вирішивши рівність відносно  $I_2$  отримали:

$$I_2 = I_1 \frac{r_1 \cos \varphi + x_1 \sin \varphi}{r_2 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi} = aI_1, \quad (6)$$

$$\text{де } a = \frac{r_1 \cos \varphi + x_1 \sin \varphi}{r_2 \cos \varphi + x_2 \sin \varphi}. \quad (7)$$

Пропускна здатність лінії за активною потужністю при перерізі  $F_1$  та  $F_2$  рівна:

$$P_1 = \sqrt{3}UI_1 \cos \varphi, \quad (8)$$

$$P_2 = a\sqrt{3}UI_1 \cos \varphi. \quad (9)$$

Виходячи з цього збільшення пропускної здатності по режиму напруги рівна:

$$\delta P = P_2 - P_1 = \sqrt{3}UI_1 \cos \varphi (a - 1) = P_1(a - 1). \quad (10)$$

Таблиця 1

Активний та реактивний опір кабелів

Переріз кабелю, мм <sup>2</sup>	активний опір $r_0$ , Ом/км	реактивний $x_0$
50	0,641	0,08
70	0,443	0,08
95	0,32	0,08
120	0,253	0,08
150	0,206	0,08
185	0,164	0,08
240	0,125	0,08

Розглянемо випадок встановлення кабельних ліній ААБл-10 замість ААШв-10, опори кабелів беремо з таблиці 1.

-  $n = 1$

$$F_1 = 50, \quad F_2 = 70, \quad r_1 = 0,641 \text{ Ом/км}, \quad r_2 = 0,443 \text{ Ом/км}, \quad x_1 = x_2 = 0,08, \quad \cos \varphi = 0,8.$$

$$a = \frac{0,641 \cdot 0,8 + 0,08 \cdot 0,6}{0,443 \cdot 0,8 + 0,08 \cdot 0,6} = 1,393,$$

$\delta P = P_1(1,393 - 1) = 0,393$  за даним критерієм заміна перерізу призведе до збільшення пропускної здатності на 39,3%.

-  $n = 2$

$$F_1 = 50, \quad F_2 = 95, \quad r_1 = 0,641 \text{ Ом/км}, \quad r_2 = 0,32 \text{ Ом/км}, \quad x_1 = x_2 = 0,08, \quad \cos \varphi = 0,8.$$

$$a = \frac{0,641 \cdot 0,8 + 0,08 \cdot 0,6}{0,32 \cdot 0,8 + 0,08 \cdot 0,6} = 1,844,$$

$$\delta P = P_1(1,844 - 1) = 0,844 - \text{збільшення пропускної здатності на } 84,4\%.$$

Отримані результати занесемо в таблицю 2 та таблицю 3.

### 1.3 За умовами зниження втрат потужності $\Delta P$ .

При передачі електричної енергії від генераторів електростанцій до споживача близько 12-18% усієї вироблюваної електроенергії втрачається в провідниках повітряних і кабельних ліній, а також в обмотках і сталевих сердечниках силових трансформаторів.

При проектуванні потрібно прагнути до зменшення втрат електроенергії на всіх ділянках енергосистеми, оскільки втрати електроенергії ведуть до збільшення потужності електростанцій, що в свою чергу впливає на вартість електроенергії [4].

Втрати активної потужності в лініях перерізом  $F_1$  і  $F_2$  будуть рівні:

$$\Delta P_1 = 3I_{o1}l \frac{\rho}{F_1}, \quad (11)$$

$$\Delta P_c = 3I_{o2}l \frac{\rho}{F_1}, \quad (12)$$

$$I_{o2} = I_{o1} \quad (13)$$

Виходячи з цих умов зниження втрат потужності  $\delta\Delta P$  буде рівна:

$$\delta\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 3\rho l \left( \frac{I_{o1}^2}{F_1} - \frac{I_{o1}^2}{F_2} \right) \cdot \frac{\Delta P_1 F_1}{3I_{o2}^2 \rho l} = \Delta P_1 \left( 1 - \frac{F_1}{F_2} \right). \quad (14)$$

-  $n = 1$

$$F_1 = 50, F_2 = 70,$$

$$\delta\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \Delta P_1 \left( 1 - \frac{F_1}{F_2} \right) = \Delta P_1 \left( 1 - \frac{50}{70} \right) = 0,29\Delta P_1, \text{ зниження на } 29\%.$$

-  $n = 2$

$$F_1 = 50, F_2 = 95,$$

$$\delta\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \Delta P_1 \left( 1 - \frac{F_1}{F_2} \right) = \Delta P_1 \left( 1 - \frac{50}{95} \right) = 0,474\Delta P_1, \text{ зниження на } 47,4\%.$$

Отримані результати занесемо в таблицю 2 та таблицю 3.

Таблиця 2

Збільшення пропускної здатності при заміні кабельної лінії на один переріз  $n = 1$ .

Переріз	Збільшення пропускної здатності за умовами нагріву у.о	Збільшення пропускної здатності за умовами зниження втрат активної потужності у.о	Збільшення пропускної здатності за умовами режиму напруги у.о
50-70	0,238	0,29	0,393
70-95	0,192	0,26	0,323
95-120	0,193	0,21	0,214
120-150	0,135	0,20	0,176
150-185	0,119	0,19	0,187
185-240	0,148	0,23	0,21

Таблиця 3

Збільшення пропускної здатності при заміні кабельної лінії на один переріз  $n = 2$ .

Переріз	Збільшення пропускної здатності за умовами нагріву, у.о	Збільшення пропускної здатності за умовами зниження втрат активної потужності у.о	Збільшення пропускної здатності за умовами режиму напруги у.о
50-95	0,476	0,474	0,844
70-120	0,423	0,417	0,607
95-150	0,354	0,367	0,428
120-185	0,27	0,351	0,397
150-240	0,285	0,375	0,437

## 2. Розглянемо ще один спосіб для підвищення пропускної здатності кабельних ліній розділення на частини та спорудження нової ділянки.

Нехай існує кабельна лінія з рівномірним навантаженням та щільністю навантаження  $P_0$  кВт/км, довжиною  $L$  км та питомим опором  $r_0$  Ом/км. Шляхом розділення існуючої лінії на частини та спорудження нової ділянки, необхідно знизити втрати активної потужності  $\Delta P$ , покращити режим напруги  $\Delta U$ , підвищити надійність електропостачання  $W_{нед}$ . При цьому необхідно вибрати оптимальне місце розрізу існуючої лінії (протяжністю  $X$ ), при якому забезпечимо мінімум втрат потужності  $\Delta P = \min$ , чи рівність втрат напруги в утворених двох лініях  $\Delta U_1 = \Delta U_2$  чи найменшу величину

недовідпущеної електроенергії  $W_{нед} = \min$ . На рисунку 1 зображено схематично лінія до та після модернізації.

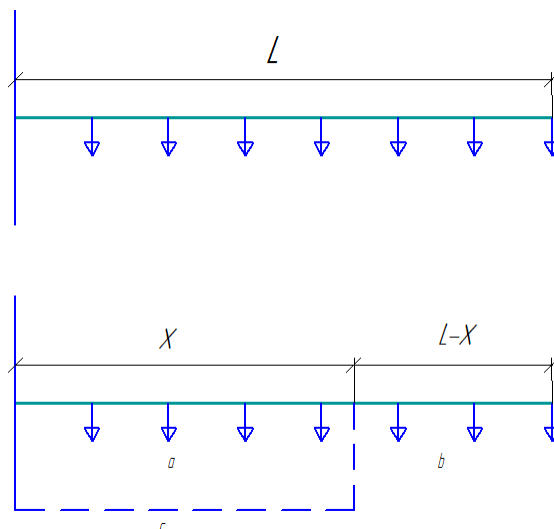


Рис.1. Схематичне зображення лінії до модернізації (а) та після (б).

Втрати активної потужності в існуючій вихідній лінії складають:

$$\Delta P_{вих} = \frac{1}{3} \frac{P_0^2}{U^2} r_0 L^3 = AL^3 \quad (15)$$

Втрати напруги в вихідній лінії:

$$\Delta U_{вих} = \frac{1}{2} \frac{P_0 r_0}{10U_n^2} L^2 = BL^2 \quad (16)$$

Недовідпуск електричної енергії в вихідній лінії  $W_{нед}$   $\kappa Bm \cdot год$  оцінюється параметром потоку відмов  $\omega_0$   $1/км \cdot рік$  та середнім часом відновлення електропостачання  $\tau_{год}$ , питомою щільністю навантаження  $P_0$   $\kappa Bm/км$ , довжиною ділянки лінії  $L$   $км$ .

$$W_{вих} = \omega_0 P_0 \tau L^2 = CL^2 \quad (17)$$

2.1 Розділення лінії на частини при умові  $\Delta U_1 = \Delta U_2$

Визначаємо втрати напруги на ділянках а, б, с перетвореної лінії, виконаною на ділянці с кабелем ААШВ-10 3х50 :

$$\Delta U_a = Bx^2 = \Delta U_{вих} X^2, \quad (18)$$

$$\Delta U_b = B(L-x)^2 = B(L^2 - 2Lx + x^2) = \Delta U_{вих} (1 - 2X + X^2), \quad (19)$$

$$\Delta U_c = 2B(L-x)x = 2B(Lx - x^2) = \Delta U_{вих} (2X - 2X^2), \quad (20)$$

де,  $X$  - відносна довжина ділянок лінії  $X = \frac{x}{L}$ .

Запишемо рівність  $\Delta U_a = \Delta U_b + \Delta U_c$  та знайдемо значення  $X$  :

$\Delta U_{вих} X^2 = \Delta U_{вих} (1 - 2X + X^2 + 2X - 2X^2) \rightarrow X^2 = 1 - X^2 \rightarrow 2X^2 = 1 \rightarrow X = 0,71$ . При цьому втрати напруги до кінців ділянок будуть складати:

$$\Delta U_a = Bx^2 = \Delta U_{вих} 0,71^2 = 0,5 \Delta U_{вих},$$

$$\Delta U_b + \Delta U_c = \Delta U_{вих} (1 - X^2) = \Delta U_{вих} (1 - 0,71^2) = 0,5 \Delta U_{вих}.$$

Таким чином втрати напруги зменшились в двічі.

Визначимо оптимальне місце розеднання лінії за умови, що на новій ділянці с приймається більший переріз кабелю. Замість ААШВ-10 3х50  $r_0 = 0,641$   $Ом/км$  встановлюємо ААБл-10 3х95  $r_0 = 0,32$   $Ом/км$ ,

отримаємо співвідношення питомих опорів  $\frac{0,641}{0,32} = 2$ . В цьому випадку втрати напруги на ділянці с складуть:

$$\Delta U_c = \frac{2}{2} B(L-x)x = B(X - X^2) = \Delta U_{вих} (X - X^2).$$

Прирівняємо втрати напруги на ділянці а -  $\Delta U_a$  і втрати напруги на ділянці а+b -  $(\Delta U_b + \Delta U_c)$  отримаємо:

$$\begin{aligned} X^2 &= 1 - 2X + X^2 + X - X^2, \\ X^2 + X - 1 &= 0, \end{aligned}$$

З цього квадратного рівняння отримуємо шукане значення  $X = 0,62$ .

При цьому втрати напруги будуть рівні:

$$\Delta U_a = \Delta U_{вих} 0,62^2 = 0,384 \Delta U_{вих}.$$

Аналогічно проведемо розрахунок в випадку заміни кабелю ААШВ-10 3х50  $r_0 = 0,641 \text{ Ом/км}$  на ААБл-10 3х150  $r_0 = 0,206 \text{ Ом/км}$ , отримаємо співвідношення питомих опорів  $\frac{0,641}{0,206} = 3,112$ . В цьому

випадку втрати напруги на ділянці с складуть:

$$\begin{aligned} X^2 &= 1 - 2X + X^2 + 0,64X - 0,64X^2, \\ 0,64X^2 + 1,36X - 1 &= 0, \\ X^2 + 2,125X - 1,563 &= 0. \end{aligned}$$

З цього квадратного рівняння отримуємо шукане значення  $X = 0,578$ .

При цьому втрати напруги до кінців ділянок будуть рівні:

$$\Delta U_a = \Delta U_{вих} 0,578^2 = 0,334 \Delta U_{вих}.$$

$$\Delta U_b + \Delta U_c = \Delta U_{вих} (1 - 2X + X^2 + 0,64X - 0,64X^2) = 0,334 \Delta U_{вих}.$$

Отримані результати заносимо до таблиці 4.

#### 2.2 Розділення кабельної лінії на частини за критерієм $\Delta P = \min$

Визначимо втрати потужності на ділянках а,б,с перетвореної лінії, на яких прийнято переріз та тип кабелю ААШВ-10 3х50,  $r_0 = 0,641 \text{ Ом/км}$ .

$$\Delta P_a = Ax^3 = \Delta P_{вих} X^3, \quad (21)$$

$$\Delta P_b = A(L-x)^3 = A(L^3 - 2L^2x + 2Lx^2 - x^3) = \Delta P_{вих} (1 - 3X + 3X^2 - X^3), \quad (22)$$

$$\Delta P_c = 3A(L-x)^2x = 3A(L^2x - 2Lx^2 + x^3) = \Delta P_{вих} (3X - 6X^2 + 3X^3), \quad (23)$$

де  $X$  - відносна довжина ділянок лінії  $X = \frac{x}{L}$ .

Виходячи з цього сумарні втрати потужності на ділянках а,б,с складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = \Delta P_{вих} (3X^3 - 3X^2 + 1).$$

Візьмемо першу похідну виразу  $\Delta P_{\Sigma}$  по  $X$ , прирівняємо нулю та вирішимо рівняння відносно  $X$ .

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial X} = 9X^2 - 6X = 0 \rightarrow X^2 - 0,67X = 0 \rightarrow X = 0,67.$$

Таким чином, оптимальне місце розділення лінії складає  $x = 0,67L$ , що забезпечує  $\Delta P_{\Sigma} = \min$ .

При цьому втрати активної потужності складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = \Delta P_{вих} (3 \cdot 0,67^3 - 3 \cdot 0,67^2 + 1) = 0,55 \Delta P_{вих} = \Delta P_{\min}.$$

Отже втрати зменшуються більш як у два рази.

Визначимо оптимальне місце розділення лінії при умові, що на новій ділянці с приймається ААБл-10 3х95  $r_0 = 0,32 \text{ Ом/км}$ , отримаємо співвідношення питомих опорів  $\frac{0,641}{0,32} = 2$ . В цьому випадку втрати активної потужності на ділянці с рівна:

$$\Delta P_c = \frac{3}{2} A(L-x)^2x = \Delta P_{вих} (1,5X^3 - 3X^2 + 1,5X).$$

Тоді сумарні втрати потужності на ділянках а,б,с складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = \Delta P_{вих} (1,5X^3 - 1,5X + 1).$$

Візьмемо першу похідну виразу  $\Delta P_{\Sigma}$  по  $X$ , прирівняємо нулю та вирішимо рівняння відносно  $X$ .

$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial X} = 4,5X^2 - 1,5 = 0 \rightarrow X^2 - 0,33 = 0 \rightarrow X = 0,577$ . При цьому втрати активної потужності

складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{вих} (1,5 \cdot 0,577^3 - 1,5 \cdot 0,577 + 1) = 0,423 \Delta P_{вих} = \Delta P_{\min}.$$

Визначимо оптимальне місце розділення лінії при умові, що на новій ділянці "с" приймається ААБл-10 3x150  $r_0 = 0,206 \text{ Ом / км}$ , отримаємо співвідношення питомих опорів  $\frac{0,641}{0,206} = 3,112$ . В цьому випадку втрати напруги на ділянці с складуть:

$$\Delta P_c = \frac{3}{2,112} A(L-x)^2 x = \Delta P_{вих} (0,96X^3 - 1,92X^2 + 0,96X).$$

Тоді сумарні втрати потужності на ділянках а,б,с складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = \Delta P_{вих} (0,96X^3 + 1,432X^2 - 2,04X + 1).$$

Візьмемо першу похідну виразу  $\Delta P_{\Sigma}$  по  $X$ , прирівняємо нулю та вирішимо рівняння відносно  $X$ .

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial X} = 2,88X^2 + 2,864X - 2,04 = 0 \rightarrow X^2 + 0,994X - 0,708 = 0 \rightarrow X = 0,48.$$

При цьому втрати активної потужності складають:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{вих} (0,96 \cdot 0,48^3 + 1,432 \cdot 0,48^2 - 2,04 \cdot 0,48 + 1) = 0,457 \Delta P_{вих} = \Delta P_{min}.$$

Отримані результати заносимо до таблиці 4.

### 2.3 Розділення лінії на частини при умові $W_{неод} = \min$ .

Недовідпуск електричної енергії під час перерви енергопостачання через вимкнення лінії електропередавання (повітряних або кабельних) обчислюється, виходячи з навантаження цих ліній і тривалості перебування їх у відключеному стані.

Недовідпуск електроенергії споживачам, спричинений аварійною зупинкою устаткування через його пошкодження або несправність, якщо є плани електроспоживання (ліміти), визначається як різниця між плановим і фактичним споживанням електроенергії за час, коли мав місце недовідпуск.

У всіх інших випадках - як різниця між середньодобовим споживанням електроенергії за попередній місяць і фактичним споживанням за час, коли мав місце недовідпуск. Указаний недовідпуск електроенергії обчислюється в документації (акти розслідування, звітна форма тощо) [5].

Визначаємо значення недовідпущеної електроенергії на ділянках лінії  $\Delta W_{неод(a)}$ ,  $\Delta W_{неод(b)}$ ,  $\Delta W_{неод(c)}$ , перетвореної лінії:

$$\Delta W_{неод(a)} = Cx^2 = \Delta W_{неод(a)}^{вих} X^2, \quad (24)$$

$$\Delta W_{неод(b)} = C(L-x)^2 = \Delta W_{неод(b)}^{вих} (1-2X+X^2), \quad (25)$$

$$\Delta W_{неод(c)} = C(L-x)L = \Delta W_{неод(c)}^{вих} (1-X), \quad (26)$$

Тоді сумарна величина недовідпущеної електроенергії складе:

$$\Delta W_{неод\Sigma} = \Delta W_{неод(a)}^{вих} + \Delta W_{неод(b)}^{вих} + \Delta W_{неод(c)}^{вих} = \Delta W_{неод\Sigma}^{вих} (2X^2 - 3X + 2)$$

Візьмемо першу похідну виразу  $\Delta W_{неод\Sigma}$  по  $X$ , прирівняємо нулю та вирішимо рівняння відносно  $X$

$$\frac{\partial \Delta W_{неод\Sigma}}{\partial X} = 4X - 3 = 0 \rightarrow X = 0,75.$$

Таким чином, оптимальне місце розділення лінії складає  $x = 0,75L$ , що забезпечує  $W_{неод} = \min$ .

При цьому величина недовідпущеної електроенергії буде рівна:

$$\Delta W_{неод\Sigma} = \Delta W_{неод(a)}^{вих} + \Delta W_{неод(b)}^{вих} + \Delta W_{неод(c)}^{вих} = \Delta W_{неод\Sigma}^{вих} (2 \cdot 0,75^2 - 3 \cdot 0,75 + 2) = 0,875$$

Отримані результати заносимо до таблиці 4.

Таблиця 4

Збільшення пропускну здатності при розділенні лінії на частини.

Кабельні лінії	Марка кабелю	$r_0 \text{ Ом / км}$	За критерієм $\Delta P$		За критерієм $\Delta U$	
			Довжина лінії с	Рівень зниженн $\Delta P$ у.о.	Довжина лінії с	Рівень зниженн $\Delta U$ у.о.
Існуюча лінія	ААШв-10 3x35	0,641	1	1	1	1
Нова ділянка с	ААШв-10 3x50	0,641	0,67	0,55	0,71	0,5
	ААБл-10 3x95	0,32	0,577	0,423	0,62	0,384
	ААБл-10 3x150	0,206	0,48	0,457	0,558	0,334

Як видно з таблиці, що збільшення перерізу на новій ділянці знизить втрати потужності та втрати напруги, а також довжина нової ділянки може бути скорочена майже в два рази.

#### Висновки

1. З ростом щільності електричного навантаження та приєднанням нових споживачів електроенергії, виникає проблема обмеження пропускної здатності електричних мереж. Значна частина електричних мереж України перевищила свій життєвий ресурс, отже можна очікувати масові роботи по реконструкції. В зв'язку з цим виникає необхідність здійснення заходів по підвищенню пропускної здатності.

2. В відповідності з ПУЕ перерізи провідників та жил кабелів в розподільних мережах 6-10 кВ повинні вибиратися згідно економічних міркувань. Даними вказівками слід користуватися також при заміні існуючих кабельних ліній на більший переріз. При цьому необхідно враховувати повну вартість по демонтажу та монтажу лінії.

3. Згідно проведених розрахунків видно, що заміна існуючого перерізу  $F_1$  на новий  $F_2$  ( $F_2 > F_1$ ) на одну стандартну ступінь та на дві дає змогу підвищити пропускну здатність за критеріями нагріву, втрат напруги, втрат потужності в середньому на 25...60 %, що порівняно з повітряними лініями отримуємо майже однаковий ефект збільшення пропускної здатності.

4. Остаточний вибір варіанту підвищення пропускної здатності кабельної лінії слід робити на основі відповідного техніко-економічного розрахунку.

#### Список літератури

1. Зорин В.В. Заходи по підвищенню ефективності режимів діючих розподільних електричних мереж/ Зорин В.В. Буйний Р.А. Іванько Д.О. Енергетика: економіка, технології, екологія №2 - 2011 70-77с.
2. Зорин В.В. Штогрин С.А. Буйний Р.О. Електричні мережі та системи Ніжин 2011-248с.
3. Карпов Ф.Ф. Розрахунок міських розподільних мереж. М. Енергія. 1968г. 224 с.
4. Зорин В.В. Тісленко В.В. Системи електропостачання загального призначення. Чернігів 2005 - 341с.
5. Міністерство палива та енергетики України (Мінпаливенерго). Наказ №255 від 09.06.2005.

V.V. Zorin, O.M. Majstrenko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

#### RAISING THROUGHPUT ON A RANGE OF CRITERIA CABLE LINES OF ELECTRICITY TRANSMISSION BY VOLTAGE 6-10 KV

*To enhance the capacity of existing transmission lines the technical solutions based on several criteria (heat, power losses, voltage mode, electricity shortage) in terms of physical and moral deterioration of electrical networks in Ukraine, changing the structure of consumption and projected gradual growth of electricity consumption by all groups of consumers, especially in the residential sector (due to the development of new technologies and innovative growth of demand). The proposed mathematical models and calculations have shown that the replacement section to a larger can improve throughput up to 25% when replacing one step and 50% when replacing two steps.*

**Key words:** throughput of transmission cable lines, section of cables, mode of operation, power losses, resistance.

1. Zorin V.V. Measures to improve the efficiency of existing modes of distribution electric networks / Zorin V.V. Buyniy R.O. Ivanko D.O. Energy: economy, technology, ecology № 2 - 2011 70-77p.
2. Zorin V.V. Shtogrin E.A. Buyniy R.O. Electrical networks and systems Nizhin 2011-248p.
3. Karpov F.F. Calculation of urban distribution networks. M. Enerhyya. 1968h. 224 p.
4. Zorin V.V. Tislenko V.V. Power supply systems for general purpose Chernihiv2005 - 341 p.
5. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine (MFE) Order № 255 of 09.06.2005.

УДК 621.316.1.017

В.В. Зорин, д-р. техн. наук, професор; О.М. Майстренко

#### Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПО РЯДУ КРИТЕРИЕВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 КВ

*Приведено научно-техническое обоснование технических мероприятий по повышению пропускной способности существующих кабельных линий электропередачи по ряду критериев (нагреву, потерям мощности, режиму напряжения, недоотпуску электроэнергии) в условиях физической и*



моральної изношенності електричних мереж України, змінення структури електропотреблення і прогнозованого поступового зростання обсягів потреблення електричної енергії всіма групами споживачів, особливо в житловому секторі (що обумовлено розвитком новітніх технологій і зростанням інноваційного попиту). Предложені математичні моделі і проведені розрахунки показали, що заміна сечення на більший дозволяє підвищити пропускну здатність кабельних ліній до 25% при заміні на одну ступінь і 50% при заміні на дві ступені.

**Ключові слова:** пропускну здатність кабельних ліній, сечення кабелів, режим роботи, втрати потужності, опір.

Надійшла 10.12.2013

Received 10.12.2013

УДК 62-83-52.003(082)

О.М. Закладний, канд. техн. наук, доцент;  
О.О. Закладний, канд. техн. наук; В.О. Броніцький  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ З ЗАСТОСУВАННЯМ ТРИРІВНЕВОГО ПІ РЕГУЛЯТОРА З FUZZY LOGIC

У статті наведено спосіб керування вентильним двигуном, який забезпечує енергоефективну роботу привода у разі зміни навантаження і частоти обертання. Для досягнення високої якості регулювання вентильного двигуна в динамічних режимах запропоновано трирівневий ПІ регулятор з fuzzy logic. Виконано дослідження привода з використанням програмного забезпечення Simulink. Отримано результати для змінного моменту навантаження.

**Ключові слова:** вентильний двигун, енергоефективність, ПІ регулятор, fuzzy logic.

**Вступ.** Удосконалення регульованого електропривода сприяє технічному прогресу в провідних галузях промисловості. Механічні і комутаційні обмеження машин постійного струму, а також технологічні вимоги та необхідність підвищення експлуатаційної надійності виробничих установок і механізмів спричинили інтенсивний розвиток регульованого привода змінного струму із синхронними двигунами з постійними магнітами (СД), що на сьогодні є найбільш перспективним [1]. Вентильний двигун (ВД) з перетворювачем на повністю керованих елементах (IGBT, IGCT) отримав значне поширення завдяки високим значенням рівня енергоефективності, відмінним регульовальним властивостям, надійності і низьким експлуатаційним витратам. Замість колектора і щіток ВД містить перетворювач і датчик положення ротора (ДПР).

**Аналіз стану проблеми.** Для керування ВД використовується 3-фазний мостовий інвертор (рис.1). Для регулювання швидкості застосовується широтно-імпульсна модуляція з частотою, яка більша ніж у 10 разів перевищує максимальну частоту обертання двигуна. Смуга пропускання інвертора, керованого за положенням ротора СД, регулюється зміною кута випередження  $\beta_0$  або  $\beta$  (кути між струмом і, відповідно, – електрорушійною силою холостого ходу та напругою двигуна). Існують такі способи керування комутатором ВД [2].

Перший, найпростіший спосіб керування, полягає в підтриманні сталого значення кута випередження  $\beta_0 = \text{const}$ , де  $\beta_0 = \beta + \theta$ ;  $\theta$  – кут навантаження СД;  $\beta = \gamma + \delta$ ;  $\gamma$  – кут комутації;  $\delta$  – кут запасу (враховує похибку системи керування і тривалість відновлення запираючих властивостей електронних ключів комутатора). Для реалізації способу застосовується датчик положення ротора (ДПР), статор якого зсувається на необхідний кут випередження 40-60 ел. град. у напрямку проти обертання ротора. Величина кута залишається сталою у всіх режимах роботи двигуна і визначається максимальним значенням струму. Для другого способу керування підтримується сталим кут випередження  $\beta = \text{const}$ . Як джерело напруги синхронізації використовується датчик напруги статора, а для задання кута випередження – система керування зі змінною частотою розгортки.