

*У статті проаналізовано проблему визначення оптимального перехідного процесу в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом на прикладі відцентрового нагнітача типу Ц-6,3. Розглянуто питання визначення моментів перемикавання, побудови оптимального перехідного процесу. Запропоновано напрям підвищення швидкодії системи антипомпажного регулювання в умовах дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу*

*Ключові слова: відцентровий нагнітач, помпаж, швидкодія, антипомпажне регулювання, оптимальний перехідний процес*

*В статье проанализирована проблема определения оптимального переходного процесса в системе антипомпажного регулирования газоперекачивающим агрегатом с газотурбинным приводом на примере центробежного нагнетателя типа Ц-6,3. Рассмотрены вопросы определения моментов переключения, построения оптимального переходного процесса. Предложено направление повышения быстродействия системы антипомпажного регулирования в условиях дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа*

*Ключевые слова: центробежный нагнетатель, помпаж, быстродействие, антипомпажное регулирование, оптимальный переходной процесс*

УДК 681.513.52:622.691.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27793

# ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ В СИСТЕМІ АНТИПОМПАЖНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗО- ПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ

А. І. Лагойда

Аспірант\*

E-mail: And\_ij@mail.ru

Г. Н. Семенов

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: kafatp@ukr.net

\*Кафедра автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ,  
Україна, 76019

## 1. Вступ

Підвищення швидкодії системи антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом (ГПА) є однією з найважливіших проблем, яка потребує наукового обґрунтування і розробки відповідного програмного і технічного забезпечення.

Швидкодія системи антипомпажного регулювання ГПА – це ключовий фактор до підвищення надійності роботи дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу. Проте ця проблема має вирішуватися для кожного ГПА окремо, оскільки функції передачі кожного з них відрізняються своїми параметрами. У цьому зв'язку важливим стає вивчення можливостей визначення оптимального перехідного процесу в реальній системі антипомпажного регулювання ГПА.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У наукових роботах зарубіжних науковців I. Fabri [1], A. Georgants [2], C. R. Sparks [3] проаналізовано можливість підвищення швидкодії систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів (ВН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) в сучасних системах автоматичного керування.

В Україні дослідженню методу антипомпажного регулювання і захисту компресорів від помпажу присвячено окремі наукові роботи В. П. Герасименко [4], С. Г. Гіренко [5], М. В. Беккер, Р. Я. Шимко, М. О. Петеш, О. В. Сукач, А. Ф. Репета [6], А. В. Слободян [7], Ю. Є. Бляут [8], О. І. Мамонов, В. В. Ніщета, В. О. Таргонський [9] та ін.

Водночас існує потреба подальших досліджень впливу динамічних властивостей відцентрових нагнітачів на можливість підвищення швидкодії системи антипомпажного регулювання з метою вивчення особливостей створення швидкодіючих автоматичних регуляторів.

## 3. Мета дослідження

Метою дослідження є визначення оптимального перехідного процесу в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом в умовах дотискувальної компресорної станції «Більче-Волиця».

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити моменти перемикавання залежностей  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_1 = f_2(t_2)$ ;
- побудови оптимального перехідного процесу на першому інтервалі;

– побудови оптимального перехідного процесу на першому і другому інтервалах.

**4. Результати досліджень оптимального перехідного процесу в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом**

Для дослідження скористаємося функцією передачі відцентрового нагнітача:

$$W(s) = \frac{E(s)}{Q(s)} = \frac{0,619}{4,099 \cdot 10^{-5} s^2 + 1,526 \cdot 10^{-2} s + 1,358},$$

де  $E$  – ступінь підвищення тиску газу;  $Q$  – продуктивність, яка була отримана в попередніх авторських дослідженнях [10].

Необхідно перевести об’єкт керування із положення  $E=0, E'=0$  при  $t=0$  в положення  $E=E_n, E'=0$  за мінімальний час. Для даної системи алгоритм оптимального керування повинен мати два інтервали керування  $\pm Q_{max}$  [13].

Отже треба визначити моменти перемикання  $t_1$  і  $t_2$  побудувати оптимальний перехідний процес з урахуванням початкових умов  $t=0, E=0, E'=0$ . Для визначення моментів перемикання і оптимального перехідного процесу скористаємося рекомендаціями викладеними в [11, 12].

Моменти перемикання визначаються функцією оптимального керування [11]:

$$t_i = f_i(s_1, s_2, \dots, s_n, \bar{E}_0, \bar{E}_n, Q_{max}), \quad (1)$$

де  $s_1, s_2, \dots, s_n$  – корені характеристичного рівняння  $T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1 = 0$ ;  $s = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа.

Отже об’єкт керування описується рівнянням другого порядку ( $n = 2$ ). Згідно теореми про  $n$  інтервалів керування дія має складатися із двох інтервалів. Кінець другого інтервалу (тобто кінець перехідного процесу) позначимо через  $t_2$ , а момент перемикання  $t_1$ . Керувальну дію приймаємо максимально можливою  $|Q_{вх}| = \pm Q_{max}$ , на першому інтервалі  $+Q_{max}$ , а на другому інтервалі  $-Q_{max}$ .

Для визначення функції (1) використаємо метод стикування рішень диференціальних рівнянь із правою частиною, що змінює знак.

Тоді для диференційного рівняння ВН як об’єкта керування:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 E(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dE(t)}{dt} + E(t) = k Q_{вх}(t) \quad (2)$$

запишемо рівняння на першому інтервалі керування у

такому вигляді  $s_1 = -\frac{1}{T_1}$  ді:

$$E(t) = C_0^* + C_1^* e^{s_1 t} + C_2^* e^{s_2 t}, \quad (3)$$

де  $C_0^* = \pm k Q_{вх}$ ,  $C_1^*, C_2^*$  – постійні інтегрування на першому інтервалі керування;  $s_1 = -\frac{1}{T_1}$ ;  $s_2 = -\frac{1}{T_2}$  – корені характеристичного рівняння другого порядку.

Після диференціювання рівняння (3) по часу отримуємо:

$$E'(t) = s_1 C_1^* e^{s_1 t} + s_2 C_2^* e^{s_2 t}.$$

У даному випадку  $n = 2$  і тому перша похідна  $E'(t)$  є  $(n-1)$ -ою похідною.

З урахуванням початкових умов при  $t=0, E=0, E'=0$  визначаємо постійні інтегрування:

$$\begin{cases} E = C_0^* + C_1^* + C_2^* = 0, \\ E' = s_1 C_1^* e^{s_1 t} + s_2 C_2^* e^{s_2 t} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Із системи рівнянь (4) визначимо:

$$\begin{cases} C_1^* = \frac{s_2}{s_1 - s_2} k Q_{вх}, \\ C_2^* = -\frac{s_1}{s_1 - s_2} k Q_{вх}. \end{cases} \quad (5)$$

Тепер запишемо розв’язок рівняння (2) на другому інтервалі керування:

$$E(t) = C_0^{**} + C_1^{**} e^{s_1 t} + C_2^{**} e^{s_2 t}, \quad (6)$$

де  $C_0^{**} = -k Q_{вх}$ ,  $C_1^{**}, C_2^{**}$  – постійні інтегрування на другому інтервалі керування.

Постійні інтегрування визначимо, користуючись кінцевими умовами при  $t=t_2, E=E_n, E'=0$ :

$$\begin{cases} E_n = C_0^{**} + C_1^{**} e^{s_1 t_2} + C_2^{**} e^{s_2 t_2}, \\ E' = s_1 C_1^{**} e^{s_1 t_2} + s_2 C_2^{**} e^{s_2 t_2} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Із системи рівнянь (7) отримуємо:

$$\begin{cases} C_1^{**} = -\frac{s_2 (E_n + k Q_{вх})}{(s_1 - s_2) e^{s_1 t_2}}, \\ C_2^{**} = \frac{s_1 (E_n + k Q_{вх})}{(s_1 - s_2) e^{s_2 t_2}}. \end{cases} \quad (8)$$

Тепер стикуємо рішення в момент перемикання  $t_1$ , а саме прирівняємо праві частини рівнянь (3) і (6) і других рівнянь системи (4) і (7):

$$\begin{cases} C_0^* + C_1^* e^{s_1 t_1} + C_2^* e^{s_2 t_1} = C_0^{**} + C_1^{**} e^{s_1 t_1} + C_2^{**} e^{s_2 t_1}, \\ s_1 C_1^* e^{s_1 t_1} + s_2 C_2^* e^{s_2 t_1} = s_1 C_1^{**} e^{s_1 t_1} + s_2 C_2^{**} e^{s_2 t_1}. \end{cases} \quad (9)$$

Перепишемо систему рівнянь (9) у такому вигляді:

$$\begin{cases} C_0^* - C_0^{**} + (C_1^* - C_1^{**}) e^{s_1 t_1} + (C_2^* - C_2^{**}) e^{s_2 t_1} = 0, \\ s_1 (C_1^* - C_1^{**}) e^{s_1 t_1} + s_2 (C_2^* - C_2^{**}) e^{s_2 t_1} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Із рівнянь (5) і (8) визначимо різниці постійних інтегрування:

$$\begin{cases} C_1^* - C_1^{**} = \frac{s_2 k Q_{вх} (e^{s_1 t_2} + 1) + s_2 E_n}{(s_1 - s_2) e^{s_1 t_2}}, \\ C_2^* - C_2^{**} = -\frac{s_1 k Q_{вх} (e^{s_2 t_2} + 1) + s_1 E_n}{(s_1 - s_2) e^{s_2 t_2}}. \end{cases} \quad (11)$$

Підставивши значення різниць постійних інтегрування в систему рівнянь (10) і врахувавши, що  $C_0^* = kQ_{BX}$ , а  $C_0 = kQ_{BX}$  після спрощень отримаємо таку систему трансцендентних рівнянь для визначення моментів перемикання в системі антипомпажного регулювання:

$$\begin{cases} \left( \frac{E_n}{kQ_{BX}} + 1 \right) e^{-s_1 t_2} - 2e^{-s_1 t_1} + 1 = 0, \\ \left( \frac{E_n}{kQ_{BX}} + 1 \right) e^{-s_2 t_2} - 2e^{-s_2 t_1} + 1 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Визначимо числові значення коренів характеристичного рівняння:

$$s_1 = -\frac{1}{T_1} = -\frac{1}{0,0034795} = -287,4,$$

$$s_2 = -\frac{1}{T_2} = -\frac{1}{0,011781} = -84,88$$

і відношення  $\frac{E_n}{kQ_{BX}} = \frac{1,42}{0,619 \cdot 500} = 0,004588$  [13].

Після підстановки їх в рівняння системи (12), отримуємо:

$$\begin{cases} (0,004588 + 1)e^{287,4t_2} - 2e^{287,4t_1} + 1 = 0, \\ (0,004588 + 1)e^{84,88t_2} - 2e^{84,88t_1} + 1 = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Ця система рівнянь може бути розв'язана лише наближено, наприклад, графічним методом (за допомогою ПК). Для цього переписемо рівняння (13) в такому вигляді:

$$e^{287,4t_1} = \frac{1,004588e^{287,4t_2} + 1}{2} = 0,502e^{287,4t_2} + 0,5,$$

$$e^{84,88t_1} = \frac{1,004588e^{84,88t_2} + 1}{2} = 0,502e^{84,88t_2} + 0,5.$$

Побудуємо залежності  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_1 = f_2(t_2)$  (рис. 1).

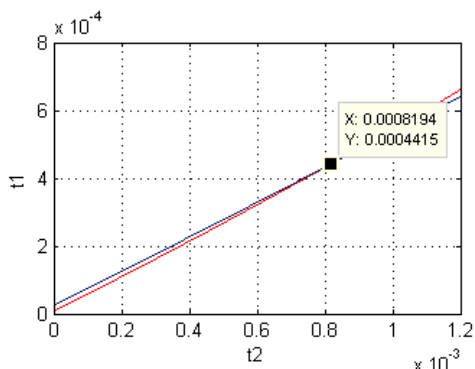


Рис. 1. Графіки залежностей  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_1 = f_2(t_2)$

Точка їх перетину дає шукані значення моментів перемикання:

$$t_1 = 0,0004415 \text{ с}, \quad t_2 = 0,0008194 \text{ с}.$$

Різниця моментів перемикання:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 0,0008194 - 0,0004415 = 0,0003779 \text{ с}.$$

Отже, для побудови оптимального перехідного процесу на першому інтервалі слід у вираз (3) підставити значення постійних інтегрування із системи (5).

Тоді отримаємо:

$$E(t) = kQ_{BX} + \frac{s_2}{s_1 - s_2} kQ_{BX} e^{s_1 t} - \frac{s_1}{s_1 - s_2} kQ_{BX} e^{s_2 t}$$

або

$$E(t) = kQ_{BX} \left( 1 + \frac{s_2}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_1}{s_1 - s_2} e^{s_2 t} \right). \quad (14)$$

Після підстановки числових значень отримаємо:

$$E(t) = 309,5 \left( 1 + \frac{-84,88}{-287,4 + 84,88} e^{-287,4t} - \frac{-287,4}{-287,4 + 84,88} e^{-84,88t} \right)$$

Розрахунки для  $0 \leq t \leq t_1$  зведені в табл. 1, за результатами якої побудовано графік залежності  $E(t)$  (рис. 2).

Із табл. 1 і рис. 2 видно, що при  $t_1 = 0,0004415$ ,  $E(t) = E_k = 0,6968571$ . Для подальших обрахунків не-

Таблиця 1

Результати розрахунків залежності  $E(t)$

t, с	0	0,0000736	0,0001472	0,0002208	0,0002944	0,000368	0,0004415
E(t)	7,813e-27	0,0202636	0,0803198	0,1790852	0,3155008	0,488531	0,6968571

обхідно визначити похідну від  $E(t)$  в кінці першого інтервалу:

$$\begin{aligned} E'_{IK} &= kQ_{BX} \left( \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} e^{s_1 t_1} - \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2} e^{s_2 t_1} \right) = \\ &= 309,5 \left( -120,45 e^{-287,4 \cdot 0,0004415} + 120,45 e^{-84,88 \cdot 0,0004415} \right) = \\ &= 3071,285. \end{aligned}$$

Оптимальний процес на другому інтервалі, тобто для  $0 \leq t \leq t_2 - t_1$  описується рівнянням (6).

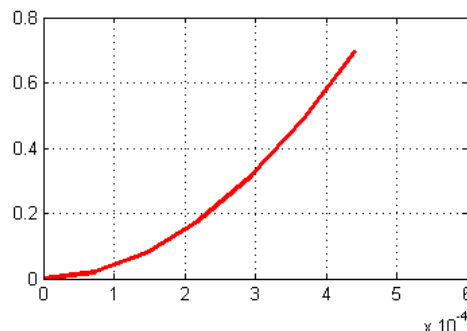


Рис. 2. Графік залежності  $E(t)$  для  $0 \leq t \leq t_1$

Умовно вважаємо, що момент перемикання є початком відліку  $t = 0$ . Тоді можна записати:

Таблиця 2

Розрахункові дані для побудови залежності  $E(t)$  при  $0 \leq t \leq t_2 - t_1$

t, c	0	0,00007558	0,00015116	0,00022674	0,00030232	0,0003779
E(t)	0.71357	0.92106	1.0801333	1.1921186	1.258306	1.279957

$$E(0) = E_{1K}$$

$$\frac{dE(0)}{dt} = E'_{1K}$$

$$E_{1K} = C_0^{**} + C_1^{**} + C_2^{**},$$

$$E'_{1K} = s_1 C_1^{**} + s_2 C_2^{**}.$$

Звідси визначаємо постійні інтегрування:

$$\begin{cases} C_2^{**} = \frac{s_1}{s_1 - s_2} (E_{1K} + kQ_{BX}) - \frac{E'_{1K}}{s_1 - s_2}, \\ C_1^{**} = -\frac{s_2}{s_1 - s_2} (E_{1K} + kQ_{BX}) + \frac{E'_{1K}}{s_1 - s_2}. \end{cases} \quad (15)$$

Після підстановки значень  $C_1^{**}$  і  $C_2^{**}$  в рівняння (6) маємо:

$$E(t) = -kQ_{BX} + \left( -\frac{s_2}{s_1 - s_2} (E_{1K} + kQ_{BX}) + \frac{E'_{1K}}{s_1 - s_2} \right) e^{s_1 t} + \left( \frac{s_1}{s_1 - s_2} (E_{1K} + kQ_{BX}) - \frac{E'_{1K}}{s_1 - s_2} \right) e^{s_2 t}.$$

Після перетворень і підстановки числових значень отримаємо:

$$E(t) = -309,5 - 0,004938 \cdot (310,197 \cdot (-287,4e^{-84,88t} + (84,88e^{-287,4t}) + 3071,285(e^{-287,4t} - e^{-84,88t})). \quad (16)$$

Побудуємо графік оптимального перехідного процесу користуючись рівнянням (16).

Розрахунки для  $0 \leq t \leq t_2 - t_1$  зведені в табл. 2.

Як бачимо, в порівнянні із випадком, коли на вхід об'єкта керування подається не оптимальна керувальна дія і коли на цей об'єкт подати оптимальну керувальну дію, швидкодія системи у другому випадку значно підвищиться.

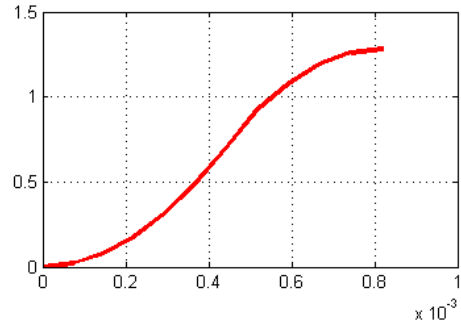


Рис. 3. Оптимальна крива перехідного процесу в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом

### 5. Висновок

У результаті проведених досліджень визначений оптимальний перехідний процес в системі антипомпажного регулювання газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом і час перехідного процесу показують, що вони суттєво відрізняються від перехідного процесу в системі для випадку, коли на вхід об'єкта керування подається не оптимальна керувальна дія.

В процесі дослідження визначені:

- моменти перемикання залежностей  $t_1 = f_1(t_2)$  і  $t_1 = f_2(t_2)$  в точці (0,0004415; 0,0008194);
- оптимальний перехідний процес на першому інтервалі час якого становить 0,0004415 с;
- оптимальний перехідний процес на першому і другому інтервалах час якого становить 0,0008194 с.

У зв'язку з цим доцільним є розроблення таких законів керування, які б забезпечили оптимальну тривалість перехідного процесу. Для цього можуть бути використані багатопараметричні регулятори типу ПІДД, ПІДД2, ПІДД2Д, ПІДД2Д2, ПІДД2Д3, ПДД2, ПДПД.

### Література

1. Fabri, I. Rotating stall in axial flow compressors [Text] / I. Fabri // Internal Aerodynamics, Institution of Mechanical Engineers. (Conference Cambridge. Session 5: Unsteady flow effects, Paper 9), 1967. – P. 96–110.
2. Georgants, A. Review of compressor Aerodynamic Instabilities [Text] / A. Gtorgants. – National Aeronautical Establishment, Canada, 1994. – P. 125–134.
3. Sparks, C. R. On the transient in tradition of centrifugal compressors and their piping systems [Text] / C. R. Sparks // Trens of the ASME. Journal of Engineering for power. – 1983. – Vol. 105. – P. 891–901. doi: 10.1115/1.3227498
4. Герасименко, В. П. К повышению устойчивости газовых систем с компрессором [Текст] / В. П. Герасименко // Авиаци.-косм. техника і технологія. – 2001. – Вип. 23. – С. 45.
5. Гіренко, С. Г. Метод автоматизованого захисту компресора дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу від помпажу [Текст] / С. Г. Гіренко // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 1 (6). – С. 43–47.
6. Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу [Текст] / Беккер М. В., Шимко Р. Я., Семенцов Г. Н., Бляут Ю. Є., Гіренко С. Г., Петеш М. О., Сукач О. В., Репета А. Ф. – № a2008 07810; заявл. 09.06.2008; опубл. 25.11.2009, Бюл. №22. – 10 с.
7. Слободян, А. В. Система передпомпажного попередження та визначення робочої точки газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 на базі мікропроцесорного контролера МІК-51 [Текст] / А. В. Слободян // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 3. – С. 31–34.

8. Бляут, Ю. Є. Енергоощадна технологія для антипомпажного керування відцентровими нагнітачами газоперекачувальних агрегатів докачуючої компресорної станції підземного сховища газу [Текст] / Ю. Є. Бляут // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 2. – С. 33–38.
9. Мамонов, О. І. Впровадження енергозберігаючих технологій при протипомпажному керуванні нагнітачами [Текст] / О. І. Мамонов, В. О. Таргонський, В. В. Ніщета // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз». – 2006. – № 1 (37). – С. 6–8.
10. Лагойда, А. І. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування [Текст] / А. І. Лагойда, Ю. Є. Бляут, Є. М. Лесів, Г. Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2 (18). – С. 72–85.
11. Олейников, В. А. Сборник задач и примеров по теории автоматического управления (оптимальное, экстремальное и программное управление) [Текст] / В. А. Олейников, Н. В. Соловьев, А. М. Пришвин, Н. С. Зотов. – М.: Высшая школа, 1968. – 200 с.
12. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
13. Бляут, Ю. Є. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом для ефективного антипомпажного регулювання [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.13.07 / Ю. Є. Бляут // Автоматизація процесів керування. – Івано-Франківськ, 2013. – 20 с.

*Наведено математичну модель для визначення ефективності сонячних колекторів, яка дає можливість оцінювати ефективність їхньої роботи і оперативно здійснювати контроль при застосуванні сонячних колекторів. Визначення ефективності сонячних елементів дозволяє приймати рішення стосовно їх подальшого використання. Розроблено пропозиції щодо вдосконалення методик випробування сонячних колекторів завдяки підвищенню точності вимірювання основних складових*

*Ключові слова: сонячний колектор, теплоносій, термopетворювач, випромінювання, температура, ефективність, опір, калібрування*

*Приведена математическая модель для определения эффективности солнечных коллекторов, которая дает возможность оценивать эффективность их работы и оперативно осуществлять контроль при применении солнечных коллекторов. Определение эффективности солнечных элементов разрешает принимать решение относительно их дальнейшего использования. Разработаны предложения относительно усовершенствования методик испытаний солнечных коллекторов путем обеспечения высшей точности измерения основных составляющих*

*Ключевые слова: солнечный коллектор, теплоноситель, термопреобразователь, излучение, температура, эффективность, сопротивление, калибровка*

УДК 658.562

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27856

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**П. Г. Столярчук**

Доктор технічних наук, професор завідувач кафедри\*

E-mail: stolyarchuk@lp.edu.ua

**М. М. Микійчук**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: mykolamm@ukr.net

**В. О. Яцук**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: vyatsuk@lp.edu.ua

**М. С. Міхалєва**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*

E-mail: galmih@lp.edu.ua

**О. І. Шпак**

Кандидат технічних наук,  
молодший науковий співробітник\*

E-mail: oxana.shpakk@gmail.com

**Т. М. Олеськів**

Аспірант\*

E-mail: taras\_oleskiv@ukr.net

\*Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації  
Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

### 1. Вступ

Сонячні перетворювачі, як джерело електроенергії, уперше почали застосовувати для енерго-

забезпечення космічних станцій більше 40 р. тому. Сьогодні сонячні батареї міцно ввійшли в буття як джерело екологічно чистої й безкоштовної енергії. Сонце завжди посилало й посилає на землю мільярди