УДК 621.51

В.В. Майсус, *старший викладач,*
М.П. Волинкін, *здобувач,*
В.О. Прокопчук, *викладач,*
А.М. Божок, *доцент ПДАТУ*

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В РЕСИВЕРІ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ

Наведено конструктивну схему і описано роботу системи автоматичного регулювання тиску в ресивері компресорної установки, а також результати її теоретичних досліджень. Представлено аналітичні вирази, які описують перехідні процеси системи.
Ключові слова: *компресор, ресивер, датчик тиску, сильфон, гнучка пневмолінія, двоплечий важіль, стрілка покажчика тиску, шкала, перепускний кран, рухомий фланець.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Компресорні установки знайшли широке застосування в різних галузях народного господарства для одержання стисненого газу за допомогою поршневих компресорів. Однак одним із недоліків поршневих компресорів є неможливість безступеневого змінювання подачі газу, що при відсутньому споживанні приводить до втрати частини приводної потужності, швидкого зносу циліндро-поршневої групи, а також до зниження їх надійності і довговічності [1-3].

Аналіз останніх спостережень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Відомий найбільш близький за технічною суттю поршневий компресор зі змінною виробністю шляхом змінювання об'єму мертвого простору. Він містить ресивер, корпус з циліндром, до якого прикріплений нагнітальний сполучений через клапан з ресивером і впускний з клапаном трубопроводи, розміщений усередині поршень зі штоком, кривошипно-шатунний механізм з джерелом енергії, зв'язаний зі штоком, мертвий простір і додаткову порожнину постійної або змінної ємності для змінювання виробності, приєднану до мертвого простору [1-3]. Проте через приєднання додаткової порожнини і ускладнення конструкції він має збільшені габаритні розміри, форсований знос, спричинений повним ходом поршня при зворотно-поступальному русі і відсутньому відборі газу з ресивера, при цьому знижується виробність в результаті зносу циліндро-поршневої групи через неможливість її компенсації за рахунок підвищення поступальної швидкості руху поршня при постійній частоті обертання його колінчастого вала. Крім цього, він не забезпечує протягом тривалого часу необхідну стабільну виробність, а також контроль за нею в процесі роботи компресора.

Мета дослідження: розробити конструктивну схему і виконати теоретичні дослідження системи автоматичного регулювання тиску (САРТ) в ресивері компресорної установки прямої дії, яка працює за принципом відхилення регульованого параметра.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблена принципово нова (патент України № 61036) САРТ повітря в ресивері мобільної компресорної установки, первинним джерелом енергії якої є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). САРТ працює за принципом відхилення тиску незалежно від системи автоматичного регулювання частоти (САРЧ) обертання колінчастого вала ДВЗ.

Джерелом стисненого повітря САРТ є поршневий компресор, що містить нерухомий циліндр 24 (рис. 1) з поршнем 23, впускними 1, 2 клапанами і нагнітальним 4 трубопроводом з нагнітальним клапаном 3. Поршень 23 з'єднаний з одним кінцем штока 22, другий кінець якого зв'язаний з одним плечем двоплечого важеля 16, друге плече його шарнірно з'єднано з корпусом 14, а середня точка через шатун 19 – з приводом 18 компресора.

Двоплечий важіль 16 має розміщену вздовж вісі порожнину, в яку встановлена пружина 13, яка взаємодіє одним торцем з важелем, а протилежним торцем – з рухомим фланцем 17,

© В.В. Майсус, М.П. Волинкін, В.О. Прокопчук, А.М. Божок, 2013

шарнірно з'єднаним з шатуном 19, з можливістю переміщуватися вздовж порожнини. До рухомого 17 і нерухомого 11 фланця герметично приєднаний сильфон 12, порожнина якого гнучкою пневмолінією 10 сполучена з порожниною ресивера 6, яка через пневмолінію 5 – з нагнітальним трубопроводом 4 компресора.

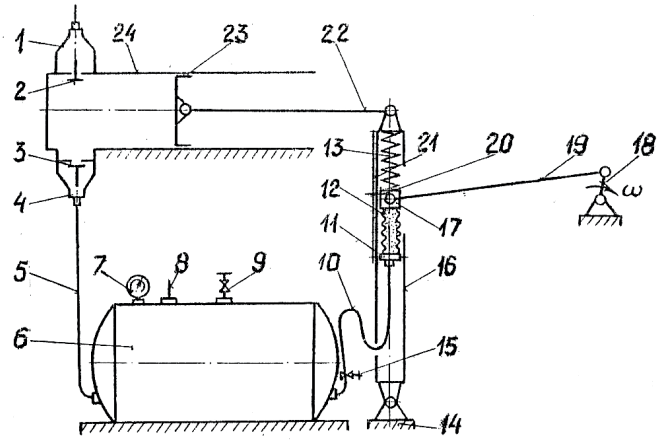

Рис. 1. Конструктивна схема САРТ повітря в ресивері компресорної установки.

Надлишковий тиск з ресивера в атмосферу стравлюється через регульований клапан 9, а відбір стисненого повітря для споживачів здійснюється пневмолінією 8.

Тиск повітря у ресивері контролюється манометром 7, а у порожнині сильфона 12 фіксується перепускним краном 15.

Для контролю за виробністю компресор оснащений покажчиком, шкала 21 якого, з поділками одиниць виробності, закріплена на важелі 16, а стрілка 20 – на рухомому фланці 17.

При відсутності надлишкового тиску повітря у ресивері 6 абсолютний тиск у його порожнині і у порожнині сильфона 12 рівний атмосферному. При цьому пружина 13, долаючи зусилля жорсткості матеріалу стінок сильфона 12, утримує рухомий фланець 17 у крайньому (нижньому, відповідно до рисунка) положенні, забезпечуючи максимальне відхилення верхнього плеча важеля 16, а отже, максимальний хід поршня 23 і виробність компресора. Від привода шатун 19 здійснює плоско-паралельний рух і при переміщенні його вправо він діє на середню частину важеля 16 і повертає його також управо на певну величину. Від переміщення важеля 16 шток 22 поршнем 23 переміститься вправо, створюючи розрідження у безштоковій порожнині циліндра 24, в яку через впускний трубопровід 1 і клапан 4 від повітроочисника поступить атмосферне повітря. Після проходження поршнем 23 правої мертвої точки і переміщення його вліво тиск у безштоковій порожнині підвищується, впускний клапан 2 закривається, а нагнітальний 3 відкривається і стиснене повітря трубопроводом 4 і пневмолінією 5 поступає у ресивер 6, підвищуючи в ньому тиск. При цьому компресор працює в режимі максимальної виробності, на що вкаже на шкалі 21 стрілка 20 покажчика, яка займатиме крайнє нижнє положення.

У процесі наповнення стисненим повітрям ресивера 6 і підвищення у ньому і у сильфоні 12 тиску рухомий фланець 17, долаючи зусилля опору пружини 13, буде переміщатися в бік верхнього плеча важеля 16, тим самим зменшуючи його передаточне відношення, і відповідно, переміщення штока 22 і поршня 23. У результаті безступеневого зменшення ходу поршня 23 безступенево буде зменшуватися і виробність компресора, на що вкаже переміщення догори стрілки 20 по шкалі 21.

При відборі частини стисненого повітря і пониження тиску у ресивері 6 рухомий фланець 17 буде переміщатися у зворотному напрямку, безступенево збільшуючи передаточне відношення важеля 16 і хід поршня 23, а отже, і виробність компресора.

У випадку, коли відбір стисненого повітря з ресивера повністю припиниться, хід поршня 23 зменшиться настільки, що подача повітря у ресивер 6 також припиниться. Тоді компресор буде працювати на холостому режимі, на що вкаже на шкалі 21 стрілка 20 покажчика, яка буде займати крайнє верхнє положення.

В описаних випадках САРТ автоматично буде підтримувати рівність між кількістю повітря, відібраного споживачами і поданим компресором в ресивер за регулюючими сигналами, пропорційними відхиленню в ньому тиску. Однак у запропонованому компресорі, при необхідності, можна вручну змінювати і фіксувати виробність при будь-якому за величиною відборі стисненого повітря. Для цього достатньо краном 15 зафіксувати у сильфоні 12 тиск повітря, а отже, хід поршня 23, який відповідатиме за показами стрілки 20 необхідній виробності. Завдяки простоті і гнучкості керування запропонована САРТ забезпечує можливість одержувати будь-які оптимальні режими експлуатації компресорної установки.

Основними динамічними ланками запропонованої САРТ газу в ресивері компресорної установки є штатні елементи: компресор – джерело стисненого газу; ресивер – об'єкт регулювання і додатково установлений датчик тиску сильфонного типу – регулююча частина. Елементи зв'язані між собою безрозмірними координатами і утворюють основний замкнутий регулюючий контур і додатковий контур подачі до споживачів стисненого газу, які представлені на структурній схемі (рис. 2). Основний контур САРТ з передаточними функціями $W_{p1}(p)$, $W_{\square}(p)$ і $W_K(p)$ охоплений одиничним від'ємним зворотнім зв'язком і паралельно до нього приєднаний розімкнутий контур з передаточною функцією $W_{p2}(p)$.

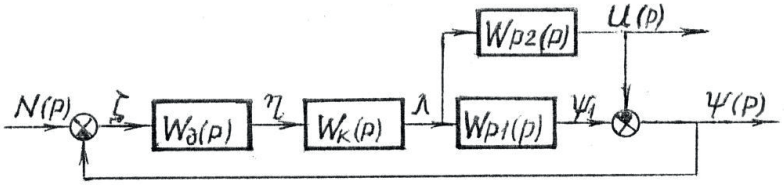

Рис. 2. Структурна схема САРТ: $W_{p2}(p)$ – передаточна функція ресивера по каналу подачі газу до споживачів; $W_{p1}(p)$ – передаточна функція ресивера по каналу поступання газу до компресора; $W_K(p)$ – передаточна функція поршневого компресора; $W_{\square}(p)$ – передаточна функція сильфонного датчика тиску; y $_1$ і y (t) – тиск газу в ресивері по каналах поступання газу до компресора і загальний; l – подача повітря з компресора в ресивер; h – вихідне переміщення з сильфонного датчика; ζ – вхідний тиск в сильфонний датчик.

Контури знаходяться під дією сигналів подачі стисненого газу $u(p)$ до споживачів і $N(p)$ – поступання газу до компресора.

Регульованим параметром є тиск газу y (p) в ресивері.

Перехідні процеси САРТ залежать від властивостей її динамічних ланок та зв'язків між ними. Динамічна рівновага ресивера описується диференціальним рівнянням інерційної ланки першого порядку [4, 7]:

$$T_{pi}\frac{dy}{dt}+y=\pm K_{pi}l\ , \tag{1}$$

де T_{pi} – постійна часу ресивера, що характеризує його інерційні властивості;

K_{pi} –коефіцієнт підсилення ресивера.

З рівняння (1) передаточна функція ресивера [8]:

– по каналу подачі газу до споживачів

$$W_{p1}(p)=\frac{K_{p1}}{T_{p1}p+1}\ , \tag{2}$$

– сигналів регулювання і поступання газу

$$W_{p1}(p)=\frac{K_{p1}}{T_{p1}p+1}\ . \tag{3}$$

Тут $p=\frac{d}{dt}$ – оператор в перетвореннях Лапласа.

При політропному стисканні повітря диференціальне рівняння руху компресора матиме вигляд [4, 7]:

$$T_K \frac{d\lambda}{dt} + \lambda = K_K \eta \,, \tag{4}$$

звідки його передаточна функція буде

$$W_K(p) = \frac{K_K}{T_K p + 1}, \tag{5}$$

де T_K – постійна часу інерції компресора;

K_K – коефіцієнт підсилення компресора.

З врахуванням того, що маса і швидкість переміщення рухомих деталей сильфонного датчика незначні і силами їх інерції можна знехтувати, датчик тиску опишеться диференціальним рівнянням інерційної ланки першого порядку [7]

$$T_\Delta \frac{d\eta}{dt} + \eta = K_\Delta z \tag{6}$$

і матиме передаточну функцію [8]

$$W_\Delta(p) = \frac{K_\Delta}{T_\Delta p + 1}, \tag{7}$$

де T_Δ – постійна часу пневматичного демпфування датчика;

K_Δ – коефіцієнт підсилення датчика.

Перехідні процеси САРТ компресорної установки, відповідно представленій структурній схемі, опишуться наступною системою диференціальних і алгебраїчних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned}
&\eta(T_\Delta p + 1) = K_\Delta z\,;\\
&\lambda\,(T_K p + 1) = K_K \eta;\\
&z = N(p) - y\,;\\
&y_1(T_{p1} p + 1) = K_{p1}\lambda\,;\\
&u(p)(T_{p2} p + 1) = K_{p2}\lambda\,;\\
&y = y - u(p)
\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Розв'язуючи (8) відносно регульованого параметра $y\,(p)$, отримаємо вираз:

$$y\,(p) = \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{\left(T_\Delta + 1\right)\left(T_K p + 1\right)\left(T_{p1} p + 1\right)\left(T_{p2} p + 1\right)\left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]} \times N(p)\,. \tag{9}$$

З врахуванням умов, які забезпечують стійкість перехідних процесів, після перетворень вираз (9) набуде вигляду:

$$y\,(p) = \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{T_\Delta T_K T_{p2} T_{p1}\left(p - p_1\right)\left(p - p_2\right)\left(p - p_3\right)\left(p - p_4\right)} \times N(p)\,, \tag{10}$$

де p_1, p_2, p_3, p_4 – корені, які є розв'язками рівняння [9]

$$\left(T_\Delta p + 1\right)\left(T_K p + 1\right)\left(T_{p1} p + 1\right)\left(T_{p2} p + 1\right) + K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right] = 0\,. \tag{11}$$

Для спрощення записів при подальших дослідженнях використані наступні позначення:

$$\left.\begin{aligned}
a &= \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p_1 + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{T_\Delta T_K T_{p2} T_{p1}\left(p_1 - p_2\right)\left(p_1 - p_3\right)\left(p_1 - p_4\right)};\\
b &= \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p_2 + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{T_\Delta T_K T_{p1} T_{p2}\left(p_2 - p_1\right)\left(p_2 - p_3\right)\left(p_2 - p_4\right)};\\
g &= \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p_3 + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{T_\Delta T_K T_{p1} T_{p2}\left(p_3 - p_1\right)\left(p_3 - p_2\right)\left(p_3 - p_4\right)};\\
d &= \frac{K_\Delta K_K \left[\left(T_{p1} T_{p2} - K_{p2} T_{p1}\right) p_4 + \left(T_{p1} - K_{p2}\right)\right]}{T_\Delta T_K T_{p1} T_{p2}\left(p_4 - p_1\right)\left(p_4 - p_2\right)\left(p_4 - p_3\right)}.
\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Здійснивши перехід до оригіналів, з врахуванням (12), реакція САРТ на східчасто-подібний сигнал $N(t)$ матиме вигляд:

$$y(t) = N_0 \left[a\frac{e^{p_1 t} - 1}{p_1} + b\frac{e^{p_2 t} - 1}{p_2} + g\frac{e^{p_3 t} - 1}{p_3} + d\frac{e^{p_4 t} - 1}{p_4} \right]. \tag{13}$$

Після підстановки у (10) значень передаточних функцій контуру витрати стисненого повітря і перетворень отримаємо:

$$u(p) = \left[\frac{K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p + (1 - K_{p2}) \right]}{T_{\square} T_K T_{p2} T_{p1} (p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4)} \times \frac{K_{\square} K_K K_{p2}}{(p+1)(p+1)(p+1)} \right] N_0. \tag{14}$$

Якщо позначити корені $p_5 = -\frac{1}{T_{\square}}$; $p_6 = -\frac{1}{T_K}$ і $p_7 = -\frac{1}{T_{p2}}$, то останнє рівняння після здійснення переходу до оригіналів можна записати у вигляді:

$$u(t) = N_0 \left[e\frac{e^{p_1 t} - 1}{p_1} + q\frac{e^{p_2 t} - 1}{p_2} + c\frac{e^{p_3 t} - 1}{p_3} + m\frac{e^{p_4 t} - 1}{p_4} + n\frac{e^{p_5 t} - 1}{p_5} + s\frac{e^{p_6 t} - 1}{p_6} + t\frac{e^{p_7 t} - 1}{p_7} \right], \tag{15}$$

де для спрощення записів використані наступні позначення:

$$\begin{aligned}
e &= \frac{-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_1 + (1 - K_{p2}) \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_1 - p_2)(p_1 - p_3)(p_1 - p_4)(p_1 - p_5)(p_1 - p_6)(p_1 - p_7)}; \\
q &= \frac{-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_2 + (1 - K_{p2}) \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_2 - p_1)(p_2 - p_3)(p_2 - p_4)(p_2 - p_5)(p_2 - p_6)(p_2 - p_7)}; \\
c &= \frac{-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_3 + (1 - K_{p2}) \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_3 - p_1)(p_3 - p_2)(p_3 - p_4)(p_3 - p_5)(p_3 - p_6)(p_3 - p_7)}; \\
m &= \frac{-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_4 + (1 - K_{p2}) \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_4 - p_1)(p_4 - p_2)(p_4 - p_3)(p_4 - p_5)(p_4 - p_6)(p_4 - p_7)}; \\
n &= \frac{T_{\square} T_K T_{p2} T_{p1} (p_5 - p_1)(p_5 - p_2)(p_5 - p_3)(p_5 - p_4) \left[-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_5 + (1 - K_{p2}) \right] \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_5 - p_1)(p_5 - p_2)(p_5 - p_3)(p_5 - p_4)(p_5 - p_6)(p_5 - p_7)}; \\
s &= \frac{T_{\square} T_K T_{p2} T_{p1} (p_6 - p_1)(p_6 - p_2)(p_6 - p_3)(p_6 - p_4) \left[-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_6 + (1 - K_{p2}) \right] \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_6 - p_1)(p_6 - p_2)(p_6 - p_3)(p_6 - p_4)(p_6 - p_5)(p_6 - p_7)}; \\
t &= \frac{T_{\square} T_K T_{p2} T_{p1} (p_7 - p_1)(p_7 - p_2)(p_7 - p_3)(p_7 - p_4) \left[-K_{\square} K_K \left[(T_{p2} - K_{p2} T_{p1}) p_7 + (1 - K_{p2}) \right] \right]}{T_{\square}^2 T_K^2 T_{p1} T_{p2}^2 (p_7 - p_1)(p_7 - p_2)(p_7 - p_3)(p_7 - p_4)(p_7 - p_5)(p_7 - p_6)}.
\end{aligned} \tag{16}$$

Таким чином, запропонована САРТ серійної компресорної установки утворена шляхом додаткового залучення до її функціонально необхідних динамічних ланок датчика тиску в ресивері, який описується диференціальним рівнянням інерційної ланки першого порядку з передаточною функцією $W_{\square}(p)$. Тому при дослідженнях перехідних процесів САРТ з використанням виразів (13), (15) параметри, що характеризують динамічні властивості ланок серійної компресорної установки, повинні фіксуватися.

Необхідні статичні показники системи можна досягати змінюванням коефіцієнта підсилення, а динамічні показники – постійної часу пневматичного демпфування датчика. Відсутність в САРТ коливальної динамічної ланки практично зменшує можливість генерування в ній коливань і втрати стійкості в перехідних процесах. Для аналізу і визначення оптимальних параметрів якості роботи системи необхідно розв'язати рівняння (13), (15) при діянні на неї найбільш характерних збурень з боку споживачів стисненого газу. Розв'язування їх можливе з використанням чисельних методів із залученням ЕОМ.

Висновки. Розроблена конструктивна схема САРТ в ресивері компресорної установки прямої дії з можливістю, за регулюючими сигналами датчика тиску, безступенево змінювати подачу

газу споживачам. Розроблена структурна схема системи, за допомогою якої отримані аналітичні вирази перехідних процесів залежно від подачі на неї вхідних і вихідних сигналів. Використання запропонованої методики дозволить розробляти і досліджувати нові та модернізувати наявні в експлуатації САРТ в ресивері компресорних установок. Застосування компресорних установок із запропонованою САРТ підвищить їх ефективність з усуненням вказаних недоліків.

Список використаних джерел

1. Черкасский В.М., Романов Т.М., Кауль Р.А. Насосы, компрессоры, вентиляторы. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.
2. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергия, 1977. – 422 с.
3. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
4. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
5. Кожевников С.Н., Есипенко Я.Н., Раскин Я.М. Механизмы. Справочник. Изд. 4-е, перераб. и доп. Под ред. С.Н. Кожевникова. – М.: Машиностроение, 1976. – 784 с.
6. Гузенков П.Г. Детали машин. 4-е изд. – М.: Высшая школа, 1986. – 360 с.
7. Власов-Власюк О.Б. Экспериментальные методы в автоматике. – М.: Машиностроение, 1969. – 412 с.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
9. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике /для научных работников/. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

***Аннотация**. Приведена конструктивная схема и описана работа системы автоматического регулирования давления в компрессорной установке, а также результаты ее теоретических исследований. Представлены аналитические выражения, описывающие переходные процессы системы.*
***Ключевые слова**: компрессор, ресивер, датчик давления, сильфон, гибкая пневмолиния, двуплечий рычаг, стрелка указателя давления, шкала, перепускной кран, подвижный фланец.*

***Annotation.** Illustration was made of a construction diagram; operation of pressure control system in a compressor air reservoir was described, as well as theoretical results. Analytical forms and descriptive system transition processes were represented.*
***Key words:** compressor, air reservoir, pressure indicator, bonnet, flexible air line, double-arm lever, pressure indicating pointer, scale, relief cock, movable flange.*

УДК 621.374

***О.А. Оленюк,** аспірант Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ

Представлені дослідження енергетичних і спектральних характеристик діодного генератора для передпосівної обробки насіння електромагнітним випромінюванням КВЧ (крайвисокочастотного) діапазону.
***Ключові слова:** передпосівна обробка насіння; електромагнітне випромінювання; крайвисокочастотний діапазон; характеристики діодного генератора.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Дослідження по впливу електромагнітного поля КВЧ діапазону на

© О.А. Оленюк, 2013