

В.Ю. Кучерук, д.т.н., професор

П.І. Кулаков, д.т.н., професор

Д.В. Мостовий, аспірант

ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОЛОКОВІДДАЧІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНТЕНСИВНОСТІ МОЛОЧНОГО ПОТОКУ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: vladimir.kucheruk@gmail.com

У статті розглянуто та теоретично досліджено похибки вимірювання разового удою, часу припуску, середньої інтенсивності молоковіддачі, інтенсивності молоковіддачі протягом тридцяти, шістдесяти та дев'яноста секунд від початку доїння, поточного удою, миттєвої інтенсивності молоковіддачі та часу припуску при використанні фотоелектричного перетворювача інтенсивності молочного потоку.

Ключові слова: *молочний потік, інтенсивність молоковіддачі, стійлова доїльна установка, фотоелектричний вимірювальний перетворювач.*

Вступ

Параметри молоковіддачі є важливою складовою комплексу параметрів технологічного процесу виробництва коров'ячого молока. Доїльний апарат, змінюючи режим пульсацій в залежності від інтенсивності молоковіддачі, налаштовується на фізіологічні особливості тварини. Вимірюючи інтенсивність молоковіддачі і здійснюючи у відповідності з її значенням управління доїнням, можна забезпечити його оптимізацію [1]. При прив'язному утриманні, на стійлових доїльних установках, удій та інші параметри молоковіддачі тварин, як правило, взагалі не вимірюються, що знижує ефективність роботи установки. Для таких установок перспективним є непряме вимірювання цих параметрів на основі результатів прямого вимірювання інтенсивності молочного потоку, результати якого використовуються для управління процесом доїння.

Аналіз літературних джерел

Тривалість доїння характеризує стан тварини, якщо цей параметр збільшився, це може свідчити про погану підготовку тварини до доїння [2]. Середня інтенсивність молоковіддачі також характеризує стан тварини, якщо вона значно зменшується у порівнянні з середнім значенням, це є ознакою наявності маститу [3]. Миттєве значення інтенсивності молоковіддачі контролюється протягом доїння з метою визначення моментів переходу до режиму додоювання та закінчення доїння. Важливими зоотехнічними параметрами є інтенсивність молоковіддачі в перші 30 секунд після початку доїння I_{30} , на часовому проміжку від 30 до 60 секунд після початку доїння I_{60} , на часовому проміжку від 60 до 90 секунд після початку доїння I_{90} . Відхилення цих параметрів від

норми свідчить про неякісну підготовку, можливу наявність маститу. Важливим показником якості роботи дояра є час припуску, який визначається як час після початку доїння, за який удій тварини склав 100 г. Якщо стан тварини нормальний, то протягом 20 с після початку доїння її мінімальний удій повинен складати 100 г [3]. Якщо час, за який було отримано 100 г молока, більший норми, це свідчить про неякісну підготовку. Важливим параметром молоковіддачі є удій тварини, зниження удою свідчить про її стресовий стан або про неналежну підготовку. Згідно з нормами [4], якщо ранковий, денний, або вечірній удій менший на двадцять і більше відсотків аналогічного удою за попередній день, то це є ознакою неякісної підготовки тварини.

При використанні ротацийних витратомірів [5] для вимірювання інтенсивності молочного потоку виникає швидке їх забруднення, що призводить до збільшення похибки вимірювання, а за допомогою існуючих засобів неможливо забезпечити їх якісне промивання. Використання ультразвукових витратомірів [6] для вимірювання інтенсивності молочного потоку виявилось малоефективним внаслідок недопустимого збільшення похибки внаслідок наявності малих значень інтенсивності потоку та малого діаметра молокопроводу. Розповсюджені ковшові перетворювачі [7] відрізняються надійністю та високою точністю, але їх неможливо використати на стійловій доїльній установці. Кореляційні перетворювачі інтенсивності молочного потоку [8] орієнтовані на використання при безприв'язному утриманні тварин, мають дуже високу вартість та забезпечують високу точність вимірювання, яка у даному випадку не потрібна.

Постановка задачі

У роботах [3, 9, 10] запропоновано фотоелектричний вимірювальний перетворювач інтенсивності молочного потоку, який може бути використаний на стійлових доїльних установках, а також на доїльних установках для безприв'язного утримання тварин невисокої цінової категорії. Похибки вимірювання параметрів молоковіддачі тварин при використанні вищевказаного вимірювального перетворювача у теперішній час не досліджені. Виходячи з цього, актуальним завданням є аналіз джерел виникнення та теоретичні дослідження похибки непрямого вимірювання параметрів молоковіддачі при використанні фотоелектричного вимірювального перетворювача інтенсивності молочного потоку, який розглянуто у роботах [3, 9, 10].

Рішення проблеми

Розглянемо фотоелектричний перетворювач інтенсивності молочного потоку [3, 9, 10], структурна схема якого наведена на рис. 1, а, а часові діаграми роботи – на рис. 1, б. Молоко на шляху до молокопроводу проходить через шланг, у якому закріплений перетворювач інтенсивності молочного потоку. Він складається з двох джерел інфрачервоного випромінювання, які знаходяться з однієї сторони трубки, двох фотоприймачів F1 та F2, які знаходяться на протилежній стороні трубки, двох порогових пристроїв C1 та C2, мікроконтролера. Молоко, яке протікає через трубку, завжди має бульбашки повітря. В результаті його вихідна напруга $U_{F1}(t)$ збільшується, за допомогою порогового пристрою C1 вона порівнюється з напругою U_{REF} .

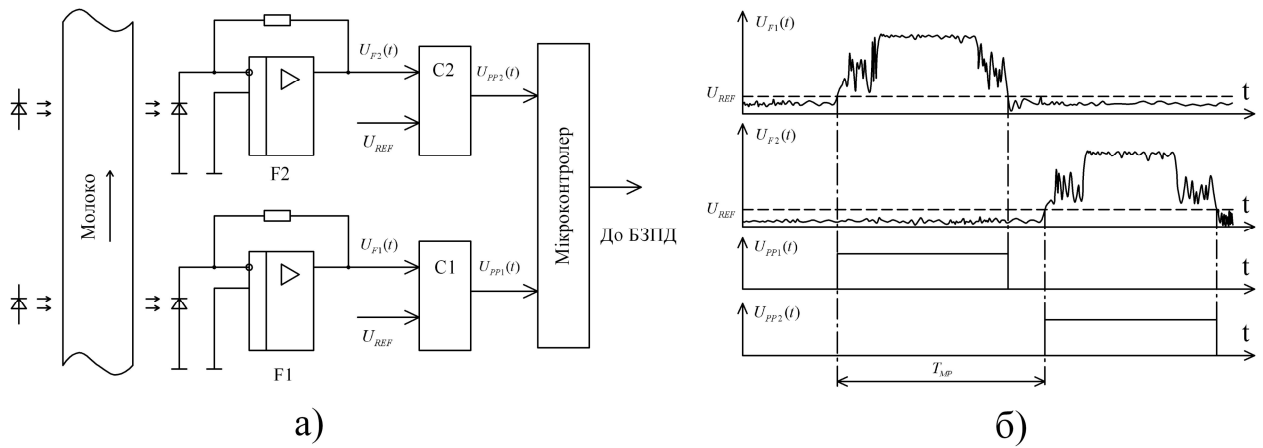


Рисунок 1 – Фотоелектричний перетворювача інтенсивності молочного потоку;

а) структурна схема; б) часові діаграми роботи;

На виході порогового пристрою С1, протягом інтервалу, коли $U_{F1}(t) > U_{REF}$, формується прямокутний імпульс $U_{PP1}(t)$, який надходить на вхід мікроконтролера. Після цього, вказана вище бульбашка, рухаючись з молочним потоком, проходить навпроти фотоприймача F2. Внаслідок цього вихідна напруга $U_{F2}(t)$ збільшується. Пороговий пристрій С2 порівнює напругу $U_{F2}(t)$ з U_{REF} , в результаті на його виході, коли $U_{F2}(t) > U_{REF}$, формується прямокутний імпульс $U_{PP2}(t)$, який надходить на інший вхід мікроконтролера. За допомогою мікроконтролера здійснюється вимірювання інтервалу T_{MP} між передніми фронтами імпульсів $U_{PP1}(t)$ та $U_{PP2}(t)$. Цей інтервал відповідає проходженню бульбашкою повітря відстані l_{MP} між фотоприймачами. Об'єм i -ї порції молока, яка відповідає проходженню бульбашкою відстані l_{MP} , визначається виразом

$$V_{MP\ i} = \pi D_{MP}^2 l_{MP} / 4, \quad (1)$$

де D_{MP} – діаметр трубки.

Миттєва інтенсивність молоковіддачі під час проходження i -ї бульбашки повітря, визначається виразом

$$I_{MV\ i} = \frac{V_{MP}}{T_{MP\ i}} = \frac{\pi D_{MP}^2}{4T_{MP\ i}} I_{MP}. \quad (2)$$

Визначене миттєве значення інтенсивності молоковіддачі передається до блоку забезпечення процесу доїння (БЗПД). У багатьох доїльних апаратів існує певна кількість режимів роботи, зміна яких відбувається за досягненням миттєвої інтенсивності молоковіддачі певних значень [4, 5], тобто здійснюється дискретне управління процесом доїння.

Розглянемо вимірювання разового удою при використанні фотоелектричного перетворювача інтенсивності молочного потоку. Протягом процесу доїння вимірюється поточний час та проводиться N_{MP} вимірювань миттєвої інтенсивності молоковіддачі $I_{MV\ i}, I_{MV\ i+1} \dots I_{MV\ N_{MP}}$ в певні моменти часу $t_i, t_{i+1} \dots t_{N_{MP}}$. Проведемо кусочно-лінійну інтерполяцію результатів вимірювання залежності миттєвої інтенсивності молоковіддачі від часу (рис. 2).

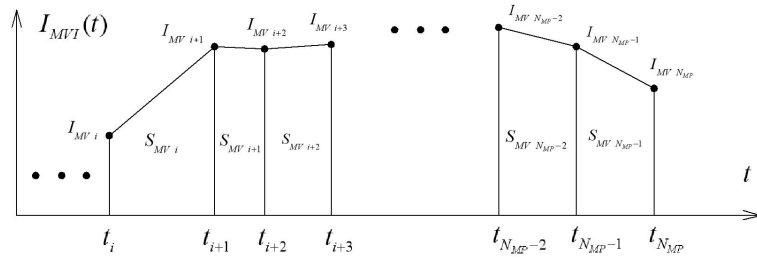


Рисунок 2 – Інтерполяція результатів вимірювання інтенсивності молочного потоку від часу

Кусочно–лінійна інтерполююча функція, яка наведена на рис. 2, визначається виразом

$$I_{MVT}(t) = \begin{cases} \frac{I_{MV_2} - I_{MV_1}}{t_2 - t_1} t + I_{MV_1} - \frac{I_{MV_2} - I_{MV_1}}{t_2 - t_1} t_1, & t \in [t_1, t_2]; \\ \dots \\ \frac{I_{MV_{N_{MP}}} - I_{MV_{N_{MP}-1}}}{t_{N_{MP}} - t_{N_{MP}-1}} t + I_{MV_{N_{MP}-1}} - \frac{I_{MV_{N_{MP}}} - I_{MV_{N_{MP}-1}}}{t_{N_{MP}} - t_{N_{MP}-1}} t_{N_{MP}-1}, & t \in [t_{N_{MP}-1}, t_{N_{MP}}]. \end{cases} \quad (3)$$

Інтенсивність молочного потоку є першою похідною залежності удою від часу. Виходячи з цього, разовий удій тварини протягом одного доїння визначається виразом

$$V_R = \int_0^{t_{N_{MP}}} I_{MVT}(t) dt = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} (I_{MV_{i+1}} + I_{MV_i})(t_{i+1} - t_i). \quad (4)$$

де $t_{N_{MP}}$ - тривалість доїння.

Як слідує з (3) та рис. 2, поточний удій тварини у довільний момент часу $t_{RP} \in (t_j, t_{j+1})$

$$\begin{aligned} V_{RP}(t_{RP}) &= \int_0^{t_{RP}} I_{MVT}(t) dt = \sum_{i=1}^{j-1} \frac{I_{MV_{i+1}} + I_{MV_i}}{2} (t_{i+1} - t_i) + \int_{t_j}^{t_{RP}} \left(\frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j}}{t_{j+1} - t_j} t + I_{MV_j} - \frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j}}{t_{j+1} - t_j} t_j \right) dt = \\ &= (I_{MV_j} + I_{RP})(t_{RP} - t_j) / 2 + \sum_{i=1}^{j-1} (I_{MV_{i+1}} + I_{MV_i})(t_{i+1} - t_i) / 2, \end{aligned} \quad (5)$$

де I_{RP} – значення функції $I_{MVT}(t)$, яка визначається виразом (3), в момент часу t_{RP}

$$I_{RP} = \frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j}}{t_{j+1} - t_j} t_{RP} + I_{MV_j} - \frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j}}{t_{j+1} - t_j} t_j. \quad (6)$$

Підставивши (6) в (5), після перетворень отримуємо вираз для визначення поточного удою тварини у довільний момент часу $t_{RP} \in (t_j, t_{j+1})$

$$V_{RP}(t_{RP}) = \frac{1}{2} \left(2I_{MV_j}(t_{RP} - t_j) + \frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j}}{t_{j+1} - t_j} (t_{RP} - t_j)^2 \right) + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{I_{MV_{i+1}} + I_{MV_i}}{2} (t_{i+1} - t_i). \quad (7)$$

На основі результатів вимірювання поточного удою в довільний момент часу визначаються інші параметри молоковіддачі. Середня інтенсивність молоковіддачі I_{MS} визначається за виразом

$$I_{MS} = V_R / t_{N_{MP}}. \quad (8)$$

Інтенсивність молоковіддачі протягом перших тридцяти секунд після початку доїння

$$I_{30} = V_{M30} / T_{30}, \quad (9)$$

де V_{M30} – удій на тридцятій секунді після початку доїння; T_{30} – інтервал тривалістю 30 секунд.

Інтенсивність молоковіддачі протягом часового інтервалу від тридцяти до шістдесяти секунд після початку доїння визначається виразом

$$I_{60} = (V_{M60} - V_{M30}) / T_{30}, \quad (10)$$

де V_{M60} – удій тварини на шістдесятій секунді після початку доїння.

Інтенсивність молоковіддачі протягом часового інтервалу від шістдесяти до дев'яноста секунд після початку доїння визначається виразом

$$I_{90} = (V_{M90} - V_{M60}) / T_{30}, \quad (11)$$

де V_{M90} – удій тварини на дев'яностій секунді після початку доїння.

При здійсненні контролю часу припуску, за виразом (7) визначається поточний удій через двадцять секунд після початку доїння.

Проведемо теоретичне дослідження похибок вимірювання параметрів молоковіддачі. Вираз (2), за яким визначається миттєва інтенсивність молоковіддачі, можна представити у вигляді

$$I_{MV i} = \frac{\pi D_{MP}^2}{4T_{MP i}} I_{MP} \pm \Delta_{MV}. \quad (12)$$

Виникнення похибки вимірювання миттєвої інтенсивності молоковіддачі Δ_{MV} зумовлене нерівномірністю потоку, неідентичністю характеристик фотоприймачів, зміною форми бульбашок, зміною форми фронтів, іншими факторами, серед яких неможливо виявити домінуючий. Виходячи з наведеного вище можна припустити, що ця похибка розподілена за нормальним законом з середньоквадратичним відхиленням (СКВ) σ_{MV} , та нульовим математичним очікуванням.

Представимо вираз (4), за яким визначається разовий удій тварини протягом доїння при використанні фотоелектричного перетворювача інтенсивності молочного потоку, у вигляді

$$V_R = \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} (I_{MV i+1} + I_{MV i} \pm 2\Delta_{MV})(t_{i+1} - t_i) / 2 \pm \Delta_{KLI} = \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} (I_{MV i+1} + I_{MV i})(t_{i+1} - t_i) / 2 \pm \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} \Delta_{MV}(t_{i+1} - t_i) \pm \Delta_{KLI}, \quad (13)$$

де Δ_{KLI} – складова абсолютної похибки вимірювання удою, виникнення якої зумовлене інтегруванням інтерполюючої функції залежності миттєвої інтенсивності молоковіддачі від часу.

Як випливає з виразу (13), максимальне значення похибки вимірювання разового удою

$$\Delta_{V_R} = \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} \Delta_{MV}(t_{i+1} - t_i) + \Delta_{KLI}. \quad (14)$$

СКВ похибки вимірювання разового удою, з урахуванням незалежності її складових

$$\sigma_{V_R} = \sqrt{\sigma_{KLI}^2 + \sigma_{MV}^2 \sum_{i=1}^{N_{MP}-1} (t_{i+1} - t_i)^2}, \quad (15)$$

де σ_{KLI} – СКВ складової похибки вимірювання удою, яка зумовлена інтегруванням інтерполюючої функції залежності миттєвої інтенсивності молочного потоку від часу.

Внаслідок наявності великої кількості впливних факторів, можна вважати, що похибка вимірювання удою розподілена нормально з нульовим математичним очікуванням.

СКВ похибки вимірювання середньої інтенсивності молоковіддачі, як випливає з (8)

$$\sigma_{MS} = \frac{1}{t_D} \sqrt{\sigma_{KLI}^2 + \sigma_{MV}^2 \sum_{i=1}^{NMP-1} (t_{i+1} - t_i)^2} \cdot \quad (16)$$

Визначимо похибку вимірювання поточного удою на двадцятій секунді після початку доїння. Представимо вираз (7) у вигляді

$$V_{RP}(t_{RP}) = \frac{1}{2} \left(2(I_{MV_j} \pm \Delta_{MV})(t_{RP} - t_j) + \frac{I_{MV_{j+1}} - I_{MV_j} \pm 2\Delta_{MV}}{t_{j+1} - t_j} (t_{RP} - t_j)^2 \right) + \sum_{i=1}^{j-1} \frac{I_{MV_{i+1}} + I_{MV_i} \pm 2\Delta_{MV}}{2} (t_{i+1} - t_i) \pm \Delta_{KLI}. \quad (17)$$

З (17), після перетворень, отримуємо вираз для максимального значення абсолютної похибки вимірювання поточного удою у довільний момент часу t_{RP}

$$\Delta_{V_{RP}} = \pm \Delta_{MV} (t_{RP} - t_j) \pm \Delta_{MV} (t_{RP} - t_j)^2 / (t_{j+1} - t_j) \pm \sum_{i=1}^{j-1} \Delta_{MV} (t_{i+1} - t_i) + \Delta_{KLI}. \quad (18)$$

СКВ похибки вимірювання поточного удою у момент часу t_{RP} , як слідує з (18)

$$\sigma_{V_{RP}} = \sqrt{2\sigma_{MV}^2 \left((t_{RP} - t_j)^4 / (t_{j+1} - t_j)^2 + (t_{RP} - t_j)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{j-1} (t_{i+1} - t_i)^2 \right) + \sigma_{KLI}^2}. \quad (19)$$

Похибка вимірювання поточного удою у довільний момент часу, з тих самих причин, що і похибка вимірювання разового удою, розподілена за нормальним законом розподілу з нульовим математичним очікуванням.

Як впливає з (9), (18) та (19), СКВ похибки вимірювання I_{30} , при $t_{RP} = t_{RP_{30}} = 30$ с

$$\sigma_{\Delta_{I_{30}}} = \frac{1}{T_{30}} \sqrt{2\sigma_{MV}^2 \left((t_{RP_{30}} - t_j)^4 / (t_{j+1} - t_j)^2 + (t_{RP_{30}} - t_j)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{j-1} (t_{i+1} - t_i)^2 \right) + \sigma_{KLI}^2}. \quad (20)$$

Похибка вимірювання параметра I_{30} , як і похибка вимірювання поточного удою у довільний час t_{RP} , має нормальний закон розподілу з нульовим математичним очікуванням.

Як впливає з виразів (10), (18) та (19), СКВ похибки вимірювання параметра I_{60} визначається співвідношенням

$$\sigma_{\Delta_{I_{60}}} = \frac{1}{T_{30}} \sqrt{2\sigma_{MV}^2 \left(\frac{(t_{RP_{60}} - t_j)^4}{(t_{j+1} - t_j)^2} + (t_{RP_{60}} - t_j)^2 + \frac{(t_{RP_{60}} - t_r)^4}{(t_{r+1} - t_r)^2} + (t_{RP_{60}} - t_r)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{j-1} (t_{i+1} - t_i)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{r-1} (t_{i+1} - t_i)^2 \right) + 2\sigma_{KLI}^2}, \quad (21)$$

де r – порядковий номер вимірювання інтенсивності молоковіддачі, яке було проведено перед моментом часу $t_{RP_{60}} = 60$ с.

Похибка вимірювання параметра I_{60} складається з похибок вимірювання поточного удою в моменти часу $t_{RP_{30}}$ та $t_{RP_{60}}$, які розподілені за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням. Виходячи з цього, вказана вище похибка вимірювання також розподілена за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням.

Як впливає з виразів (11), (18) та (19), СКВ похибки вимірювання параметра I_{90}

$$\sigma_{\Delta_{I_{60}}} = \frac{1}{T_{30}} \sqrt{2\sigma_{MV}^2 \left(\frac{(t_{RP_{90}} - t_v)^4}{(t_{v+1} - t_v)^2} + (t_{RP_{90}} - t_v)^2 + \frac{(t_{RP_{60}} - t_r)^4}{(t_{r+1} - t_r)^2} + (t_{RP_{60}} - t_r)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{v-1} (t_{i+1} - t_i)^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{r-1} (t_{i+1} - t_i)^2 \right) + 2\sigma_{KLI}^2}, \quad (22)$$

де ν – порядковий номер вимірювання інтенсивності молоковіддачі, яке було проведено перед моментом часу $t_{RP\ 90} = 90$ с.

Похибка вимірювання I_{90} складається з похибок вимірювання поточного удою в моменти часу $t_{RP\ 60}$ та $t_{RP\ 90}$, які розподілені за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням. Виходячи з цього, вищевказана похибка також розподілена за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням.

Висновки

Теоретично досліджено похибки вимірювання разового удою, часу припуску, середньої інтенсивності молоковіддачі, інтенсивності молоковіддачі протягом тридцяти секунд від початку доїння, інтенсивності молоковіддачі протягом інтервалу від тридцяти до шістдесяти секунд від початку доїння, інтенсивності молоковіддачі протягом інтервалу від шістдесяти до дев'яноста секунд від початку доїння, поточного удою, миттєвої інтенсивності молоковіддачі при використанні запропонованого фотоелектричного перетворювача інтенсивності молочного потоку.

Список літератури

1. Фененко, А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика. / А. І. Фененко –К. : ННЦ «ІАЕ», 2008. – 198 с.
2. Тверской, Г. Б. Регуляция секреции молока / Г. Б. Тверской. – Л. : Наука, 1972. – 356 с.
3. Кулаков П. І. Елементи теорії вимірювального контролю параметрів біотехнічної системи доїння / П. І. Кулаков. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 220 с.
4. Админ, Е. И. Технология производства молока на промышленной основе / Е. И. Админ, Е. Н. Зюнкина, Б. А. Корсун – К. : Урожай, 1983. – 160 с.
5. Цой, Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю. А. Цой. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 424 с.
6. Залманзон, Л. А. Микропроцессоры и управление потоками жидкости и газа / Л. А. Залманзон. – М. : Наука, 1984. – 320 с.
7. А. с. 1158118 СССР, МПК А01J 7/00. Устройство для управления процессом доения / Винников И. К., Дриго В. А., Талинский Р. В., Забродина О. Б. (СССР). – 3644471/30–15 ; заявл. 21.09.1983; опубл. 30.05.1985, Бюл. № 20.– 5 с.
8. DeLaval / Tetra Laval Group. – Режим доступу : www.delaval.com
9. Кучерук В. Ю. Датчик інтенсивності молоковіддачі переносного доїльного апарату для стійлового молокопроводу / В. Ю. Кучерук, Є. А. Паламарчук, П. І. Кулаков, Т. В. Гнесь // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 3. – С. 44 – 48.
10. 46. Kucheruk, V. Measuring of the relative milk mass fraction in water-milk Solution // V. Kucheruk, P. Kulakov, E. Palamarchuk, N. Storozhuk, W. Wojcik, M. Zhassandykyzy // Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017, p. 83 – 87, doi:10.15199/48.2017.03.20