

УДК 637.115

Теоретичні основи лічильника молока на базі проточного датчика ємнісного типу

Ткач В. В., к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України,
e-mail: 3993980@gmail.com, тел.: +38(067) 399-39-80

Ткачук С. В., провідний інженер, Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України,
e-mail: tsv2@i.ua, тел.: +38(095) 780-14-06

Анотація

Мета. Розробка методу визначення витрати пульсуючого потоку молока за допомогою аналізу сигналу проточного датчика ємнісного типу.

Методи. Математичне моделювання сигналу проточного датчика ємнісного типу під час проходження крізь нього пульсуючого потоку молока.

Результати. Розроблено математичну модель, що розкриває взаємозв'язок між сигналом проточного датчика ємнісного типу, його конструкційними параметрами та параметрами пульсуючого потоку молока (об'єм і швидкість порцій).

На основі розробленої математичної моделі отримано залежності для визначення витрати молока через молокопровідний шланг доїльного апарата.

Висновки. Отримані залежності дозволяють створити лічильник молока для доїльного апарата на базі проточного датчика ємнісного типу.

Ключові слова: автоматизація доїння, датчик витрати молока, ємнісний датчик, машинне доїння, облік індивідуального надою.

UDC 637.115

The principle of the milkmeter based on electric capacitive type flow sensor

Tkach V. V., PhD. tech. sciences, National Scientific Center "Institute of Agricultural Engineering and Electrification" of the NAAS of Ukraine,
e-mail: 3993980@gmail.com, tel.: +38(067) 399-39-80

Tkachuk S. V., senior engineer, National Scientific Center "Institute of Agricultural Engineering and Electrification" of the NAAS of Ukraine
e-mail: tsv2@i.ua, tel.: +38(095) 780-14-06

Annotation

Purpose. Development of the method for determining the pulsating milk flow by analyzing the signal of a capacitive type flow sensor.

Methods. The mathematical modeling of the signal of a capacitive type sensor during the milk flow through it.

Results. Is developed the mathematical model that reveals the relationship between the signal of a capacitive type milk flow sensor and its design

parameters and parameters of the pulsating milk flow (volume and speed of milk portions). On the basis of the developed mathematical model, dependencies are obtained to determine the flow rate of milk through the hosepipe of the milking unit.

Conclusions. The obtained dependencies make it possible to create a milk counter for milking unit based on a capacitive type milk flow sensor.

Keywords: automation of milking, the milk flow sensor, an electric capacitive type sensor, machine milking, Individual milk yield accounting.

УДК 637.115

Теоретические основы счетчика молока на базе проточного датчика емкостного типа

Ткач В. В., к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН Украины,
e-mail: 3993980@gmail.com, тел.: +38(067) 399-39-80

Ткачук С. В., ведущий инженер, Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН Украины,
e-mail: tsv2@i.ua, тел.: +38(095) 780-14-06

Аннотация

Цель. Разработка метода определения расхода пульсирующего потока молока путем анализа сигнала проточного датчика емкостного типа.

Методы. Математическое моделирование сигнала проточного датчика емкостного типа при прохождении сквозь него пульсирующего потока молока.

Результаты. Разработана математическая модель, раскрывающая взаимосвязь между сигналом проточного датчика емкостного типа, его конструкционными параметрами и параметрами пульсирующего потока молока (объем и скорость порций). На основе разработанной математической модели получены зависимости для определения расхода молока через молокопроводный шланг доильного аппарата.

Выводы. Полученные зависимости позволяют создать счетчик молока для доильного аппарата на базе проточного датчика емкостного типа.

Ключевые слова: автоматизация доения, датчик расхода молока, емкостный датчик, машинное доение, учет индивидуального надоя.

Постановка проблемы. З огляду на сучасні тенденції розвитку обладнання для молочного тваринництва, створення засобів оперативного моніторингу інтенсивності молоковидення в процесі машинного доїння є вкрай актуальним питанням, без вирішення якого не можливо повною мірою реалізувати потенціал технологій точного тваринництва та забезпечити створення адаптивної доїльної апаратури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Представленим на ринку засобам моніторингу інтенсивності молоковидення притаманна низка недоліків, а проте вітчизняні пристрої на основі датчиків

проточного типу відсутні [12]. Лідером ринку таких пристроїв є оптичні (інфрачервоні) сенсори типу FFS-30 виробництва SCR [1]. Ці ж сенсори у своєму обладнанні використовують світовий лідер із виробництва обладнання для молочного тваринництва – DeLaval [2]. Датчик виконано як трубку зі змінною формою перерізу (в зоні встановлення оптичної групи трубка має прямокутний переріз). Пристрій – компактний, не містить рухомих механічних частин і не створює механічних перешкод для вільного руху пульсуючого потоку молока.

Фірмою BECO розроблено проточний датчик інтенсивності молоковидення емнісного принципу дії [3]. Характерною особливістю доїльної апаратури BECO є значний внутрішній діаметр молокопроводного шланга доїльного апарата (22 мм на відміну від загально прийнятих 15–16 мм). До цього ж типу пристроїв належать проточні датчики інтенсивності молоковидення від Papazoo [4].

Важливими є не лише контроль інтенсивності молоковидення та облік індивідуального надоя, але й визначення таких показників, як провідність молока, його температура та ін. Згадані вище параметри молока можливо оцінити непрямими методами, наприклад, через електричну ємність, електропровідність чи діелектричну сталу. А проте одними з найпростіших (за конструкцією) є датчики емнісного типу. Однак суттєва відмінність сигналу емнісного датчика для різних фізичних проявів рідин (суцільне середовище, поверхнева плівка, піна [5]) і відсутність відповідних алгоритмів інтерпретації сигналу перешкоджають використанню

ємнісних датчиків для контролю інтенсивності молоковидедення та обліку молока.

Мета досліджень. Розробка методу визначення витрати пульсуючого потоку молока за допомогою аналізу сигналу проточного датчика ємнісного типу.

Методи досліджень. Математичне моделювання сигналу проточного датчика ємнісного типу під час проходження крізь нього пульсуючого потоку молока.

Результати досліджень. Для створення лічильника молока на основі проточного датчика ємнісного типу слід врахувати наступні особливості:

- фізичний стан рідини – молока [6, 9] (найбільший вплив на електричні властивості датчика створюють: молоко як суцільне середовище, молочна піна, молочна плівка на стінках датчика);
- режим потоку молока [7, 11] (характерним є пульсуючий потік молока порціями, що повністю заповнюють переріз молокопроводного шлангу, але мають різну довжину та швидкість руху);
- певна відмінність електричних властивостей молока одержаного в різний період і від

різних тварин, що впливають на сигнал датчика [8].

Розглянемо спрощену модель проточного датчика ємнісного типу під час проходження крізь нього молока (рис. 1). Датчик має прямокутний переріз і характеризується наступними конструкційними параметрами: висотою h_d (висота обкладинок вимірювального конденсатора), шириною a_d (відстань між обкладинками вимірювального конденсатора), площею перерізу S_d та довжиною L_d (довжина обкладинок вимірювального конденсатора). Датчик встановлено в розріз молокопроводного шлангу доїльного апарату 1, в процесі роботи крізь датчик у пробковому режимі [7] проходять порції молока довжиною L_m зі швидкістю V_m .

Від так об'єм молока, одержаного за сеанс доїння, визначається залежністю:

$$W_m = S_d \times \sum L_{m,i}, \quad (1)$$

де W_m – об'єм молока, м³;

S_d – площа перерізу датчика, м²;

$\sum L_{m,i}$ – сумарна довжина порцій молока, які пройшли крізь датчик упродовж доїння, м.

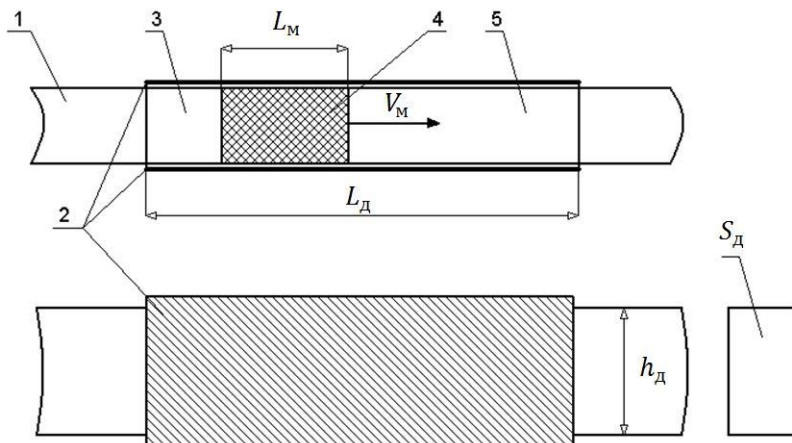


Рис. 1. Схема проточного датчика ємнісного типу:

- 1 – молокопроводний шланг доїльного апарату; 2 – обкладинки вимірювального конденсатора; 3 – частина датчика змочена порцією молока; 4 – заповнена молоком частина датчика; 5 – частина датчика змочена попередньою порцією молока; L_d – довжина обкладинок; h_d – висота обкладинок; L_m – довжина молочної пробки; V_m – вектор швидкості молочної пробки; S_d – площа перерізу датчика

Fig.1. Circuit of the electric capacitive type flow sensor:

- 1 – milking machine hosepipe; 2 – capacitor plates; 3 – recent milk skin part of the sensor; 4 – milk filled part of the sensor; 5 – previous milk skin part of the sensor; L_d – plates length; h_d – plates height; L_m – length of milk plug; V_m – velocity vector of milk plug; S_d – sectional area of sensor

Для визначення довжини порції молока потрібно встановити, як змінюється сигнал датчика під час її проходження.

Задача ускладнюється тим, що сигнал змоченого молоком датчика після проходження чергової порції молока (на стінках датчика утворюється молочна плівка) значно відрізняється від сигналу порожнього незмоченого датчика.

Тому вихідний сигнал датчика у загальному вигляді слід розглядати як суму сигналів окремих його частин (рис. 1):

$$F_d = F_M + F_{нп} + F_{сп}, \quad (2)$$

де F_d – вихідний сигнал датчика;

F_M – сигнал частини датчика зайнятої молоком;

$F_{нп}$ – сигнал частини датчика позаду чергової порції молока (нова плівка);

$F_{сп}$ – сигнал частини датчика попереду чергової порції молока (стара плівка).

Водночас порції молока можуть бути двох типів: коротшими або довгими за довжину обкладинок датчика (відповідно короткі або довгі молочні пробки).

Сигнал короткої молочної пробки визначається залежністю:

$$F_d^k = k_d h_d L_M, \quad (3)$$

де F_d^k – сигнал короткої молочної пробки;

k_d – чутливість датчика;

h_d – висота обкладинок датчика, м;

L_M – довжина порції молока, м.

Сигнал довгої молочної пробки відповідає максимально можливому рівню сигналу датчика й визначається залежністю:

$$F_d^d = F_d^{max} = k_d h_d L_d, \quad (4)$$

де F_d^d – сигнал довгої молочної пробки;

F_d^{max} – максимально можливий сигнал датчика.

Повністю заповнений молоком датчик має найбільший рівень сигналу, оскільки характеризується найбільшою ємністю та найменшими діелектричними втратами, порівнюючи з сигналом молочної піни та молочної плівки.

Розглянемо динаміку сигналу датчика змоченого молоком (молочною плівкою) за умови відсутності піни [12] (рис. 2).

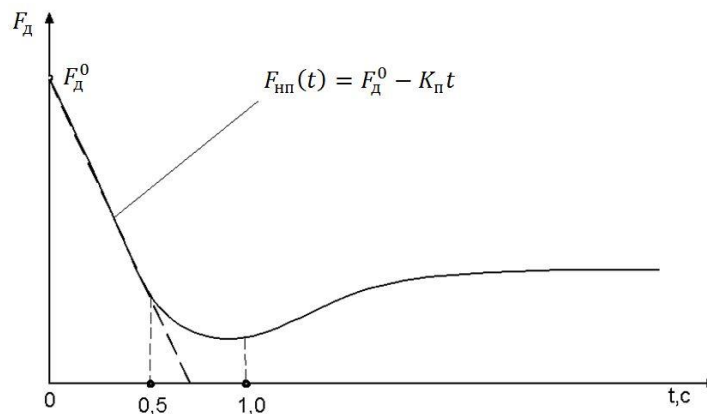


Рис. 2. Динаміка сигналу ємнісного датчика змоченого молоком після проходження чергової порції молока (сигнал від молочної плівки на стінках датчика)

Fig. 2. The dynamics of the sensor signal of the time after the milk portion passing (this is the signal of milk skin on the sensors walls)

У момент часу 0 крізь датчик пройшла чергова порція молока, відбулось змочування датчика молоком, на його стінках утворилась молочна плівка. Водночас сигнал датчика на інтервалі часу від 0 до приблизно 0,5 секунд можливо інтерполювати лінійною функцією. З

урахуванням частоти роботи пульсатора сучасних доїльних апаратів як одночасної, так і попарної дії в процесі доїння молочна плівка на стінках датчика існуватиме в межах вказаного вище часового інтервалу та визначається залежністю:

$$F_{\text{нп}}(t) = F_{\text{д}}^0 - K_{\text{п}}t, \quad (5)$$

де $F_{\text{д}}^0$ – сигнал датчика в момент часу $t = 0$;
 $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт пропорційності.

Конкретні значення інтерполяційних коефіцієнтів не є сталими величинами та залежать від низки факторів: матеріал корпуса датчика, провідність молока, робочий тиск у молокопровідній лінії, температура. Водночас, за умови визначення коефіцієнтів інтерполяції безпосередньо під час доїння перед надходженням кожної молочної пробки, вплив цих факторів значно послаблюється.

Розглянемо процес проходження молочних пробок крізь ємнісний датчик, у такому

разі будемо вважати чинними наступні припущення:

- швидкість молочної пробки в момент проходження через датчик є сталою;
- датчик має прямокутний переріз;
- молочна пробка має форму паралелепіпеда, а його грані ортогональні щодо стінок датчика;
- датчик був миттєво змочений молоком у момент часу t_1 до підходу чергової молочної пробки.

Розглянемо випадок проходження крізь датчик короткої молочної пробки (рис. 3).

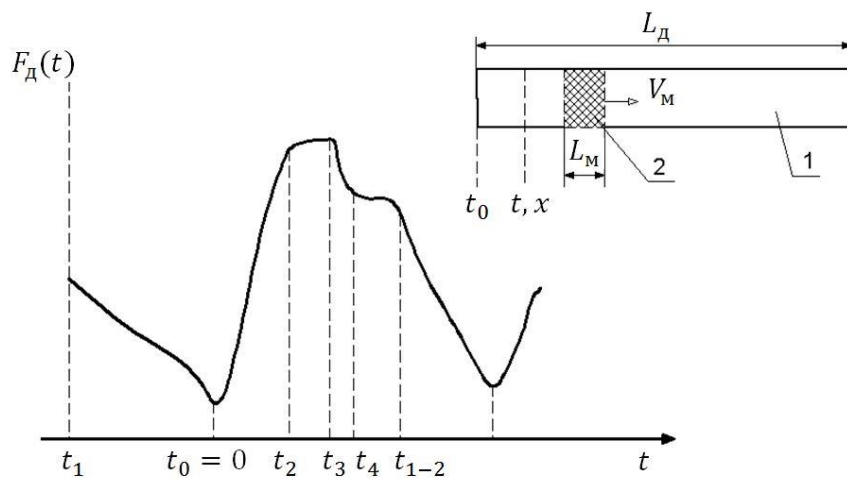


Рис. 3. Динаміка сигналу ємнісного датчика при проходженні крізь нього молочних пробок:

1 – датчик; 2 – молочна пробка; L_m – довжина молочної пробки; V_m – швидкість;

$t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_{1-2}$ – характерні моменти часу

Fig. 3. The dynamics of the signal of the capacitive sensor when passing through milk portions:

1 – sensor; 2 – milk plug; L_m – length of milk plug; V_m – speed of the milk plug;

$t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_{1-2}$ – typical times

У момент часу t_1 попередня молочна пробка пройшла крізь датчик – почався процес стягування (релаксації) молочної плівки. Починаючи з цього моменту та до моменту надходження наступної молочної пробки датчик не містить молока, спостерігається сигнал молочної плівки від попередньої молочної пробки. У момент часу t_0 чергова порція молока підійшла до входу в датчик.

У момент часу t_2 чергова порція молока повністю зайшла в датчик, у такому разі спостерігається сигнал, який є сумою сигналів від молочної пробки та плівки від попередньої порції молока.

У момент часу t_3 молочна пробка підійшла до виходу з датчика, в такому разі сигнал датчика є сумою сигналів від молочної пробки та утвореної нею плівки.

У момент часу t_4 молочна пробка вийшла з датчика, починається вихід залишків молока, в такому разі сигнал формується впливом залишків молока, молочної піни та новоутвореної плівки.

Розкриємо складові сигналу ємнісного датчика під час проходження крізь нього короткої молочної пробки відповідно до залежності (2):

$$F_{\text{д}}^{\text{к}}(t) = F_{\text{м}}(t) + F_{\text{нп}}(t) + F_{\text{сп}}(t), \quad (10)$$

$$F_{\text{нп}}(t) = \int_0^{x^{1-L_M}} (k_0 - k \frac{x^{1-L_M-x}}{V_M}) h_d dx, \quad (11)$$

$$F_{\text{сп}}(t) = (k_0 - kt) \times (S_0 - V_M h_d t), \quad (12)$$

де $F_d^k(t)$ – сигнал датчика під час проходження короткої молочної пробки;

$F_M(t)$ – сигнал ділянки датчика, зайнятої молоком;

$F_{\text{нп}}(t)$ – сигнал ділянки датчика, змоченої черговою порцією молока;

$F_{\text{сп}}(t)$ – сигнал ділянки датчика, змоченої попередньою порцією молока;

$k_0 = F_d^0/S_0$ та $k = K_{\text{п}}/S_0$ – питомі коефіцієнти; S_0 – площа обкладинок датчика.

Після інтегрування, підстановки складових і заміни $x = V_M t$, залежність (10) буде такою:

$$F_d^k(t) = h_d (V_M t - L_M) \times \left[k_0 - \frac{k}{2} \left(t - \frac{L_M}{V_M} \right) \right] + [k_0 - k(t_1 + t)] \times \left[1 - \frac{t \times V_M}{L_d} \right] \times S_0 + k_d L_M h_d. \quad (13)$$

За умови, що на момент визначення довжини короткої молочної пробки чергова порція молока повністю зайшла в датчик, а утворена нею плівка ще не розповсюдилась на його міжобкладинковий простір (момент часу t_2 , рис. 3), одержимо залежність для визначення довжини коротких пробок:

$$L_M^k = \frac{F_d^k - F_{\text{сп}}(t_1 + t_2)}{F_d^{\text{max}} - F_{\text{сп}}(t_1 + t_2)} \times L_d. \quad (14)$$

Під час проходження крізь датчик довгої молочної пробки його об'єм повністю заповнюється молоком, а сигнал досягає максимального значення, визначити довжину порції за рівнянням (14) стає неможливим. Водночас для визначення довжини порції молока достатньо встановити час її входу та виходу з датчика, а також швидкість руху (рис. 3):

$$L_M^d = (t_4 - t_0) \times V_M^d. \quad (15)$$

Враховуючи принцип роботи проточного датчика ємнісного типу, швидкість довгої молочної пробки пропорційна швидкості наростання сигналу датчика від його значення в момент часу t_0 до максимального значення

сигналу в момент його повного заповнення молоком і може бути визначена із залежності:

$$V_M^d = L_d / t_2. \quad (16)$$

Висновки

Отримані залежності дозволяють створити лічильник молока для доїльного апарата на базі проточного датчика ємнісного типу, при цьому в межах умов даної математичної моделі, результат обчислення обсягу молока не залежить від характеристик ємнісного датчика, а отже, і від електричних властивостей молока.

Бібліографія

1. URL: <http://www.scrdairy.com/milking-intelligence/freeflow-series.html>
2. URL: <http://www.delaval.ru/-/Product-Information1/Milking/Products/Milking-point/Milk-recording/MM25-SG>
3. URL: <http://www.becoknows.com>
4. URL: <http://www.panazoo.it/mmcompact-plus.html>
5. Карташов Л. П. Динамика эмульсий в сложных закрытых каналах технологического оборудования. РИО УрО РАН, 2013.
6. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality valuation of foods – a review / Shyam Narayan Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya, Rajiv Sharma, Pranita Jaiswal, Ramesh Kumar and Rishi Bhardwaj. *Journal of Food Science and Technology*. 2011 Aug.
7. Механизация и автоматизация производства молока / В. В. Адамчук, А. И. Фененко, В. В. Братишко, В. В. Ткач [и др.]. Нежин, 2013. 324 с.
8. Dielectric Properties of Raw Milk as Functions of Protein Content and Temperature / Zhu X., Guo W., Jia Y. [et al.]. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. No. 8. 670 p.
9. Семихина Л. П. Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень, 2005.
10. Adamson A. Physical chemistry of surfaces. A wiley-interscience publication. Ney York, London, Sidney, Toronto, 1976.
11. Цой Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм, М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010.
12. Ткачук С. В., Ткач В. В. Обґрунтування принципу дії проточного датчика витрат молока ємнісного типу. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний зб.* / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2016. Вип. 3 (102). С. 113–119.

Bibliografija

1. URL: <http://www.scrdairy.com/milking-intelligence/freeflow-series.html>
2. URL: <http://www.delaval.ru/-/Product-Information1/Milking/Products/Milking-point/Milk-recording/MM25-SG>
3. URL: <http://www.becoknows.com>
4. URL: <http://www.panazoo.it/mmcompact-plus.html>
5. Kartashov L. P. Dinamika emulsiy v sloshnich zakritich kanalach technologicheskogo oborudovania, RIO UrO RAN, 2013.
6. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality valuation of foods – a review / Shyam Narayan Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya, Rajiv Sharma, Pranita Jaiswal, Ramesh Kumar and Rishi Bhardwaj. *Journal of Food Science and Technology*. 2011 Aug.
7. Mechanizaciya i avtomatizaciya proizvodstva moloka / V. V. Adamchuk, A. I. Fenenko, V. V. Bratishko, V. V. Tkach [i dr.]. Nejin, 2013. 324 s.
8. Dielectric Properties of Raw Milk as Functions of Protein Content and Temperature / X. Zhu, W. Guo, Y. Jia. [et al.]. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. No. 8. 670 p.
9. Semichina L. P. Dielectricheskie i magnitnie svoystva vodi v vodnich rastvorach i bioobjektach v slabich electromagnitnich poljah. Tjumen, 2005.
10. Adamson A. Physical chemistry of surfaces. A wiley-intercience publication. Ney York, London, Sidney, Toronto, 1976.
11. Tcoy U. A. Procesi i oborudovanie doilnomolochnich otdeleniy zhivodnovodcheskich ferm. M.: GNU VIESCH, 2010.
12. Tkachuk S. V., Tkach V. V. Obgruntuvaniy principu dii protochnogo datchika vitrati moloka yemnisnogo tipu. *Mechanizatciya ta elektificatciya silskogo gospodarstva:zagalnodervjavnij zb. / NNC «IMESG»*. Glevaha, 2016. Vip. 3 (102). S. 113–119.

Bibliography

1. URL: <http://www.scrdairy.com/milking-intelligence/freeflow-series.html>
2. URL: <http://www.delaval.ru/-/Product-Information1/Milking/Products/Milking-point/Milk-recording/MM25-SG>
3. URL: <http://www.becoknows.com>
4. URL: <http://www.panazoo.it/mmcompact-plus.html>
5. Kartashov L. P. Dynamics of emulsions in complex closed channels of process equipment, RIO UrO RAN, 2013.
6. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality valuation of foods – a review / Shyam Narayan Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya, Rajiv Sharma, Pranita Jaiswal, Ramesh Kumar and Rishi Bhardwaj. *Journal of Food Science and Technology*. 2011 Aug.
7. Mechanization and automation of milk production / V. V. Adamchuk, A. I. Fenenko, V. V. Bratishko, V. V. Tkach [et al.]. Nejin, 2013. 324 p.
8. Dielectric Properties of Raw Milk as Functions of Protein Content and Temperature / X. Zhu, W. Guo, Y. Jia [et al.]. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. No. 8. 670 p.
9. Semichina L. P. Dielectric and magnetic properties of water in aqueous solutions and bioobjects in weak electromagnetic fields. Tjumen, 2005.
10. Adamson A. Physical chemistry of surfaces. A wiley-intercience publication. Ney York, London, Sidney, Toronto, 1976.
11. Tcoy U. A. Processes and equipment of milking and milk divisions of livestock farms. M.: SNU VIESCH, 2010.
12. Tkachuk S. V., Tkach V. V. To substantiation the principle of the milk flow electric capacitive type sensors. *Mechanization and electrification of agriculture:collected papers / NSC “IAEE”*. 2016. Issue 3 (102). P. 113–119.