

Павло Кулаков, Аркадій Саркісов (Україна, Вінниця)

ДАТЧИК ПРОХОДЖЕННЯ ПОРЦІЇ МОЛОКА

На доїльних установках УДМ-200, які виготовляються ВАТ “Брацлав”, або подібних, доїння відбувається шляхом послідовного підключення двох або трьох доїльних апаратів до тварин, які вишукані у лінію. У лінії знаходиться 20-25 тварин, кожна лінія обслуговується одним доярем. У корівнику знаходиться від чотирьох до восьми ліній. Молоко від кожної тварини потрапляє в зливну трубу, після цього стікає в дозатор, який знаходиться в кінці кожної лінії. Після того як в дозаторі накопичується порція молока визначеного об’єму, спрацьовує зливний клапан і порція молока зливається в автоматичну мішалку. Заробітна плата доярам нараховується у відповідності з кількістю порцій молока, які сформував дозатор. Для підрахунку цих порцій використовуються спеціалізовані лічильники.

В теперішній час використовуються лічильники з датчиком, принцип дії якого полягає у наступному [1]. Після проходження порції молока від дозатора через зливний клапан, молоко потрапляє у гнучкий шланг. У перетині шлангу розташована труба з вмонтованими електродами. При проходженні порції скрізь трубу, між електродами змінюється електропровідність, що є ознакою спрацьовування дозатора. При зміні електропровідності датчик формує імпульс, який реєструється лічильником. Цей датчик при забрудненні електродів молочним каменем значно зменшує свою чутливість. Це приводить до того, що він починає вести себе непередбачено – пропускає деякі порції, або формує імпульси при відсутності проходження порції. Окрім того цей датчик реагує на водний розтин молока. Ця обставина дає змогу доярам закачувати воду у молокопровід і тим самим завищувати власні показники удою.

Пропонується варіант датчика проходження порції молока, який дозволяє досягти стабільних показників при підрахунку порцій молока і окрім того, дає можливість встановити факт розбавлення молока водою.

Розглянемо фотоприймач на основі пари фотодіод - операційний підсилювач. На рис. 1, а, наведено його принципову схему, а на рис. 1, б - еквівалентну схему.

У цій схемі фотодіод VD діє як генератор струму, а операційний підсилювач DA перетворює цей струм у напругу.

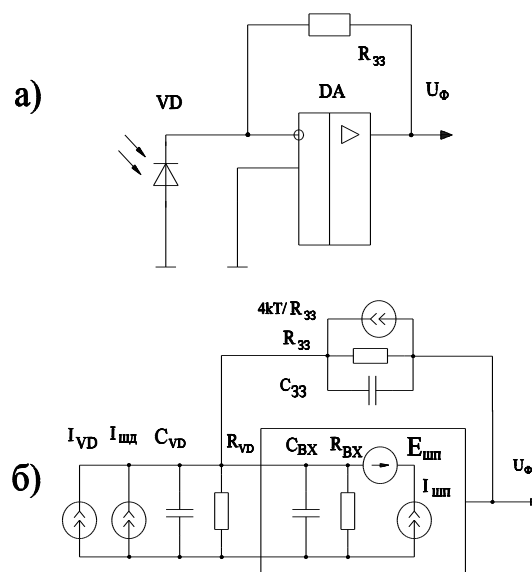


Рис. 1. Фотоприймач на основі пари фотодіод-операційний підсилювач

Залежність струму, що протікає через фотодіод, від потоку опромінення, описується виразом [2]

$$I_{VD} = \frac{\Phi S_{I0}}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}} - I_S \left(\exp \left(\frac{e_e U_{VD}}{kT} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

де I_{VD} - струм фотодіоду,

S_{I0} - інтегральна струмова чутливість фотодіоду при немодульованому опроміненні,

Φ - потік опромінення,

I_S - темновий струм фотодіоду,

U_{VD} - падіння напруги на фотодіоді,

T - абсолютна температура,

k - постійна Больцмана,

e_e - заряд електрону;

Ω - циклічна частота потоку опромінення;

τ_{VD} - постійна часу фотодіоду, яка залежить від значень внутрішнього опору фотодіоду R_{VD} , паразитної ємності фотодіоду C_{VD} , часу розсасування неосновних носіїв заряду.

Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, з урахуванням зміщення нулю, різниці вхідних струмів, напруги шуму, описується виразом [3]

$$U_{\Phi} = \frac{I_{VD} R_{33}}{1 + R_{33}/K R_{BX} + 1/K} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + U_{\text{ш}}, \quad (2)$$

де K - коефіцієнт передачі операційного підсилювача,

R_{BX} - вхідний опір операційного підсилювача,

U_{3M} - напруга зміщення нулю операційного підсилювача,

ΔI - різниця вхідних струмів операційного підсилювача,

$U_{\text{ш}}$ - напруга шуму на виході фотоприймача.

Модуль вихідної напруги шуму визначається виразом [4]

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{E_{\text{шп}}^2 + (I_{\text{шп}}^2 + I_{\text{шд}}^2 + I_{33}^2) R_{33}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{шп}}$ - спектральна щільність напруги шуму операційного підсилювача,

$I_{\text{шп}}$ - спектральна щільність шумового струму операційного підсилювача,

$I_{\text{шд}}$ - спектральна щільність шумового струму фотодіоду,

I_{33} - спектральна щільність шумового струму опору зворотного зв'язку.

Щільність шумового струму фотодіоду, що працює у фотовольтаїчному режимі [4]

$$I_{\text{шд}} = \sqrt{4kT \Delta f / R_{VD}}, \quad (4)$$

де Δf - ефективна смуга пропускання електронного тракту.

Щільність шумового струму опору зворотного зв'язку [4]

$$I_{33} = \sqrt{4kT \Delta f / R_{33}}. \quad (5)$$

В загальному випадку, вхідний опір та опір зворотного зв'язку має реактивний характер. Тому у комплексній формі, вираз (2) записується як

$$\dot{U}_\Phi = \frac{\dot{I}_{VD} \dot{Z}_{33}}{1 + \dot{Z}_{33} / \dot{K} \dot{Z}_{BX} + 1 / \dot{K}} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_\text{ш} = \frac{\dot{I}_{VD} \dot{Z}_{33} \dot{Z}_{BX} \dot{K}}{\dot{Z}_{BX} \dot{K} + \dot{Z}_{BX} + \dot{Z}_{33}} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_\text{ш}, \quad (6)$$

де \dot{U}_Φ - комплексна амплітуда вихідної напруги фотоприймача,

$\dot{U}_\text{ш}$ - комплексна шумова напруга,

\dot{K} - комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача,

\dot{Z}_{33} , \dot{Z}_{BX} - відповідно комплексний опір в колі зворотного зв'язку та комплексний вхідний опір операційного підсилювача.

Опори \dot{Z}_{33} , \dot{Z}_{BX} визначаються виразами

$$\dot{Z}_{33} = R_{33} / (1 + j\Omega R_{33} C_{33}), \quad (7)$$

де C_{33} - паразитна ємність кола зворотного зв'язку

$$\dot{Z}_{BX} = R_{BX} / (1 + j\Omega R_{BX} C_{BX}), \quad (8)$$

де C_{BX} - вхідна ємність операційного підсилювача.

Комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача без зворотного зв'язку визначається як [4]

$$\dot{K} = K_0 / (1 + j\Omega / \Omega_{ГР}), \quad (9)$$

де K_0 - коефіцієнт передачі операційного підсилювача на нульовій частоті,

$\Omega_{ГР}$ - гранична циклічна частота операційного підсилювача.

Еквівалентний опір навантаження фотодіоду визначається виразом

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{EH} &= \dot{Z}_{33} / (1 + \dot{K} + \dot{Z}_{33} / \dot{Z}_{BX}) = \\ &= R_{33} / (1 + j\Omega C_{33} R_{33}) \cdot \left(1 + K_0 / (1 + j\Omega / \Omega_{ГР}) + \frac{R_{33}}{R_{BX}} \cdot \frac{1 + j\Omega C_{BX} R_{BX}}{1 + j\Omega C_{33} R_{33}} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Підставимо (1) в (10) та знайдемо падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD} \dot{Z}_{EH} = \frac{S_{I0} \Phi}{1 + j\Omega \tau_{VD}} \dot{Z}_{EH} - \dot{Z}_{EH} I_S (\exp(e_e \dot{U}_{VD} / kT) - 1). \quad (12)$$

Так як фотодіод працює у фотовольтаїчному режимі, падіння напруги на ньому мале та складає одиниці мВ. Відоме співвідношення $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \rightarrow 0$ дає змогу спростити вираз (12)

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD} \dot{Z}_{EH} = S_{I0} \dot{Z}_{EH} \Phi / (1 + j\Omega \tau_{VD}) - \dot{Z}_{EH} I_S e_e \dot{U}_{VD} / kT. \quad (13)$$

Провівши нескладні перетворення, отримуємо вираз, який визначає падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U}_{VD} = \frac{S_{I0}}{1 + j\Omega \tau_{VD}} \dot{Z}_{EH} \Phi / \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right). \quad (14)$$

Підставивши (10) в (14), (14) в (1), (7), (8), (9) в (6), після перетворень, отримуємо вираз, що описує математичну модель фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач

$$\dot{U}_\Phi = \frac{K_0 R_{BX} R_{33} S_{10} \Phi}{(1 + j\Omega \tau_{VD}) \left(R_{33} + R_{BX} (K_0 + 1) - \frac{\Omega^2}{\Omega_{GP}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{GP}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33} (K_0 + 1)) \right) \right)} - \frac{I_S \left(\exp \left(\frac{e_e S_{10} \dot{Z}_{EH} \Phi}{kT (1 + j\Omega \tau_{VD})} \right) \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) - 1}{R_{33} + R_{BX} (K_0 + 1) - \frac{\Omega^2}{\Omega_{GP}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{GP}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33} (K_0 + 1)) \right)} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_\text{ш} \cdot \quad (15)$$

Якщо знову скористатись співвідношенням $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \rightarrow 0$ стосовно другого члену виразу (15), він прийме вигляд

$$\dot{U}_\Phi = \frac{\left(K_0 R_{BX} R_{33} S_{10} - I_S e_e S_{10} \dot{Z}_{EH} / kT \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) \Phi}{(1 + j\Omega \tau_{VD}) \left(R_{33} + R_{BX} (K_0 + 1) - \frac{\Omega^2}{\Omega_{GP}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{GP}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33} (K_0 + 1)) \right) \right)} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_\text{ш} \cdot \quad (16)$$

Вираз (16) можна спростити. Різниця вхідних струмів ΔI для сучасних операційних підсилювачів складає одиниці нА, а напруга зміщення U_{3M} - одиниці мВ. При умовах $U_\Phi \gg U_{3M}$ та $I_{VD} \gg \Delta I$, значеннями U_{3M} та ΔI можна знехтувати. При використанні елементної бази з низьким рівнем шумів, шумовою складовою виразу (16) можна знехтувати. Внаслідок малого значення падіння напруги на фотодіоді при його роботі у фотовольтаїчному режимі та малого значення темного струму, друга складова чисельника виразу (16) близька до нуля. З урахуванням цих умов вираз (16) приймає вигляд

$$\dot{U}_\Phi = \frac{\Phi S_{10} K_0 R_{BX} R_{33} / (1 + j\Omega \tau_{VD})}{K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \Omega^2 R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) / \Omega_{GP} + j\Omega \left((R_{33} + R_{BX}) / \Omega_{GP} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33} (K_0 + 1)) \right)} \quad (17)$$

Із (17) випливає, що при виконанні вищевказаних умов, вихідна напруга фотоприймача прямо пропорційна світловому потоку, який попадає на фоточутливий шар фотоприймача.

В більшості випадків гранична частота фотодіоду значно менша за граничну частоту операційного підсилювача. Тому спад частотної характеристики в області верхніх частот визначається частотними властивостями фотодіоду. Це дає змогу знехтувати впливом паразитної ємності в колі зворотного зв'язку та вхідною ємністю операційного підсилювача. Вхідний опір сучасних операційних підсилювачів складає десятки МОм, що значно перевищує опір в колі зворотного зв'язку та внутрішній опір фотодіоду. Тому можна прийняти $R_{BX} = \infty$. При умові, що частота опромінення значно менша за граничну частоту фотодіода, його частотними властивостями можна знехтувати.

Вираз (17) з урахуванням усіх вищевказаних припущень прийме вигляд

$$U_\Phi = S_{10} R_{33} \Phi \cdot \quad (18)$$

Вираз (18) є максимально спрощеною математичною моделлю фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, і з нього випливає, що вихідна напруга такого фотоприймача прямо пропорційна світловому потоку. Усі вище вказані припущення справедливі для нашого випадку, тому як дозатор формує порцію молока один раз на одну-дві хвилини, і відповідно частота вихідного сигналу фотоприймача дуже низька.

Розроблений датчик уявляє собою трубу, в яку вмонтовано інфрачервоний світлодіод. Навпроти світлодіоду в трубу монтується інфрачервоний фотодіод, який входить до складу лінійного фотоприймача на операційному підсилювачі. На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що світловий потік, утворений інфрачервоним світлодіодом, при проходженні скрізь молоко зменшується за гіперболічним законом в залежності від відсоткового вмісту води у молоці. Експериментальні залежності вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач від вмісту води у молоці при різних значеннях струму світлодіода і відповідно світлового потоку наведені на рисунку 2.

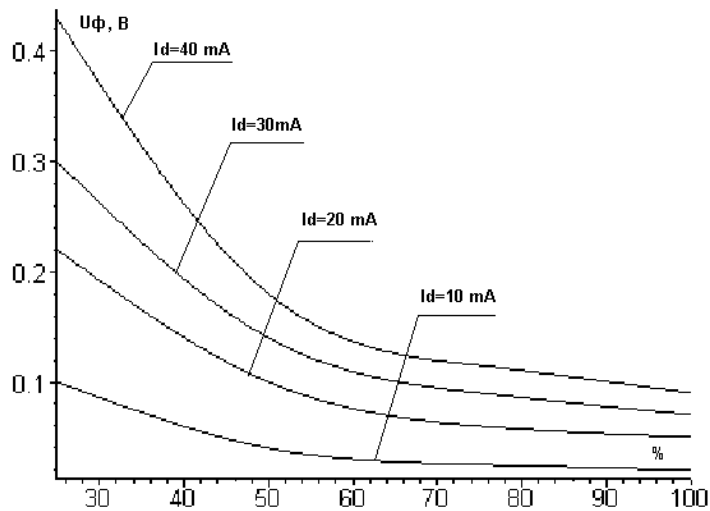


Рис. 2. Залежності вихідної напруги фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач від вмісту молока у розчині при різних значеннях струму світлодіода

Ступінь зменшення незначно залежить від багатьох факторів – таких як жирність молока, вмісту білка, вмісту амінокислот та інших. Дана обставина дає змогу створити датчик проходження порції молока, який окрім реєстрації порції дозволяє приблизно оцінити вміст води у молоці. У випадку перевищення вмісту води порція молока не зараховується, а лічильник формує сигнал попередження.

Характерна осцилограма сигналу на виході фотоприймача при проходженні молока крізь перетин датчика наведена на рис. 3.

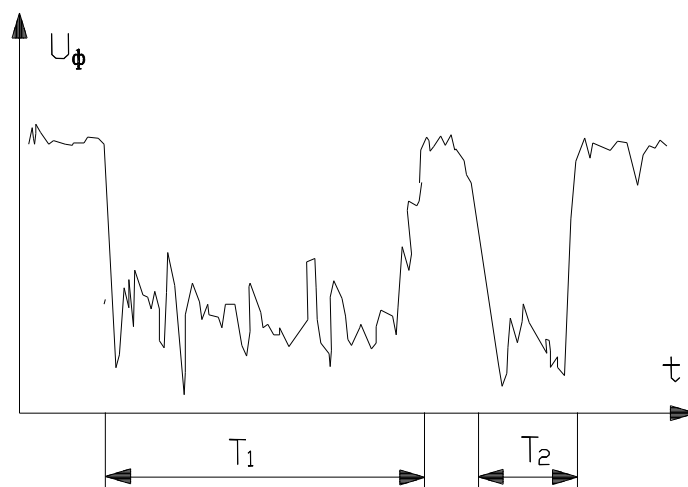


Рис. 3. Характерна осцилограма сигналу на виході фотоприймача

На рис. 3 виділено дві характерні ділянки вихідного сигналу фотоприймача. Перша ділянка тривалістю T_1 відповідає проходженню молока під тиском від дозатора, друга ділянка тривалістю T_2 відповідає зворотньому зливу молока. Значення T_1 та T_2 залежать від настроювання дозатора (він як правило настроюється на зпрацьовування при надходженні одного літру молока).

Для обробки вихідного сигналу датчика можливо використовується аналого-цифровий перетворювач, і в подальшому обробляється вихідний код АЦП з метою визначення наявності води. Алгоритм обробки коду полягає у наступному. Обчислюється середнє значення вихідної напруги фотоприймача під час проходження порції молока за виразом

$$U_c = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (19)$$

де U_c - середнє значення вихідної напруги фотоприймача під час проходження порції молока ;
 $U_i - i$ – те значення вихідного коду АЦП;
 n – кількість вибірок.

Чим більше буде процентний вміст води у молоці, тим більше буде середнє значення вихідної напруги фотоприймача під час проходження порції молока. При струмі $I_d = 40$ мА світлодіоду, який використовувався у експериментальних дослідженнях, значення середньої вихідної напруги фотоприймача, яка відповідає 30 % вмісту молока, складає приблизно 400 мВ.

Датчик також нечутливий до забруднення молочним каменем, тому як інфрачервоне випромінювання проходить крізь нього майже без втрат потужності. При сильному забрудненні молочний камінь знімається щіткою. Як показали експериментальні дослідження датчика, цю процедуру достатньо проводити раз у квартал. Аналог потребує чищення не рідше раз у місяць. Датчик, що пропонується, має просту конструкцію, низьку собівартість, добру повторюваність характеристик і низьку споживану потужність. Розкид вихідних характеристик експериментальної партії датчиків у кількості 100 екземплярів не перевищував 20 %.

Слід зазначити, що пропонуємий датчик не може бути використаний для вимірювання процентного вмісту води у молоці або інших параметрів молока. З його допомогою можливе лише встановлення наявності води у молоці в кількості 30 – 70 %. В теперішній час на фермах України експлуатується близько 300 розроблених датчиків.

Література

1. Доїльна установка УДМ-200. Паспорт, технічний опис і інструкція з експлуатації. – Брацлав. - 1985. - 165 с.
2. Кулаков П.І. Математична модель фотоелектричного перетворювача площа-напруга на основі пари фотодіод-операційний підсилювач. Матеріали п'ятої міжнародної НТК «Контроль і управління у складних системах». – Вінниця. – 1999. - Том 2., С. 228 - 233.
3. М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников, О.В. Смолин Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
4. Справочник по приемникам оптического излучения / В.А. Волков, В.К. Вялов, Л.Г. Гассанов и др.; Под. Ред. Л.З. Криксунова и Л.С. Кременчугского. - К.: Техніка, 1985. - 216 с.