

УДК. 621.396: 681.5.015.23:681.5.015.24
DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-191-201](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-191-201)

**А.М. Мацуй, к.т.н., доц.
В.О. Кондратець, д-р т.н., проф.**
Центральноукраїнський національний технічний університет

Теоретичне дослідження системної стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу для агрегатів з обертовими частинами

Автоматизація управління подрібненням руди стримується відсутністю достатньо точних систем передачі інформації з обертових частин агрегатів на нерухомі. Метою роботи є теоретичне дослідження системної стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу. У роботі вирішуються задачі теоретичного дослідження стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу, обґрунтування радіопередавальної, радіоприймальної систем і автоматичного регулятора режиму підсилення. Застосовувалися методи аналізу, дослідження радіопередавальних і радіоприймальних пристроїв, дискретних систем управління, теорії автоматичного управління, цифрових систем. В результаті теоретичних досліджень встановлено, що частотна стабільність радіоканалу висока, а ампліудна – низька. У цьому радіоканалі на перше місце виступає ампліудна стабільність, яка в радіотехніці не розв'язувалася. Доведено, що ампліудну стабільність можливо підвищити до необхідних значень встановленням заданого значення коефіцієнта підсилення радіоканалу. Коефіцієнт підсилення встановлюється подачею еталонного сигналу і автоматичним регулюванням в підсилювачі низької частоти приймача цифровим контролером з відносно низькою похибкою $\pm 1\%$. Управління функціональними вузлами радіоканалу здійснюється цикловою системою. Вперше створено радіоканал для передачі сигналів з обертових частин агрегатів на нерухомі, в якому досягається висока ампліудна стабільність. Експериментальною перевіркою встановлено практично повний збіг параметрів випадкового процесу на вході і виході радіоканалу. Дисперсії сигналів на вході модулятора і виході радіоканалу відповідно склали 1,8585 і 1,8489 ум.од., число позитивних викидів за нульовий рівень – 4, спектральні щільності займають діапазон від 50 до 250 Гц.

Ключові слова: радіоканал; ампліудна модуляція; обертова; нерухома частини; стабілізація підсилення; точність передачі.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями. У гірничорудній промисловості України магнетитовий концентрат більш вартісний порівняно з економічно розвинутими країнами, що зменшує його конкурентоспроможність та виробів чорної металургії на світовому ринку. Реалізація Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 липня 2013 р. № 603-Р «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020 року» передбачає послабити ці недоліки. На реалізацію поставлених задач спрямовані і плани наукових досліджень Центральноукраїнського національного технічного університету, зокрема, держбюджетна тема «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних витратах» (державний реєстраційний номер 0115U003942). Позитивно вплинути на ці процеси можливо удосконаленням автоматичного управління подрібненням руди [1, с. 5], однак в роботі [2, с. 13] звертається увага на відсутність надійних засобів необхідної точності або на досить значну вартість окремих давачів. В роботі [1, с. 177], крім того, зроблено акцент на необхідність пошуку і обґрунтування параметрів, що піддаються автоматичному контролю і безпосередньо характеризують енергетичну ефективність процесу руйнування матеріалу в барабані млина. Такий контролюючий засіб запропоновано [3], але він потребує системи передачі інформації з обертової частини агрегату на нерухому, які практично не розроблялися. Зважаючи на сказане, тема даної публікації, спрямованої на створення такої системи, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В практиці гірничо-збагачувальної галузі використовуються акустичні і вібраційні канали передачі інформації, однак передають вони лише сигнали, які формуються при роботі технологічних агрегатів. Оптичні канали можуть передавати інформацію, що формується окремими перетворювачами, однак розповсюдження не отримали в наслідок ряду вад – передача лише по прямій, порушення надійності в наслідок тремтіння променя та ін. Івашенко М.М. в роботі [4, с. 65] відмічає перспективність радіотехнічних систем в якості засобів зв'язку з промисловими об'єктами. Дальній зв'язок здійснюють звичайними радіотехнічними системами [5]. Прикладом використання радіотехнічної системи для передачі інформації з обертової частини агрегату на нерухому є пристрій [6], який пройшов перевірку у виробничих умовах. Безпроводні технології, розглянуті в [7], використовують радіоканал, але в роботі розглядаються лише дослідження об'єкта, а самому радіоканалу увага практично не приділяється. В авторському свідоцтві [8] також вказується лише

на те, що передавач встановлено на обертовій частині, а приймач – на нерухомій. Розглянуті радіотехнічні засоби працюють на різних частотах, їх структура і особливості не враховувалися. Не можливо робити судження про достовірність отриманої з об'єкта спостереження інформації. Зокрема, не розглянуті питання точності передачі інформації в наслідок амплітудної нестабільності радіоканалу.

Постановка завдання. Метою даної публікації є теоретичне дослідження системної стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу, спрямоване на підвищення точності передачі інформації, яка, наприклад, являє собою випадковий процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- шляхом аналізу встановити основні особливості радіоканалу;
- теоретично дослідити системну стабілізацію підсилювальних властивостей радіоканалу, визначити еталонний сигнал та тип регулювального органу;
- теоретично дослідити циклове керування радіоканалом;
- функціональним підходом створити мобільну частину радіоканалу;
- на базі аналізу логічних функцій, які підлягають реалізації, створити радіоприймач з автоматично регульованим коефіцієнтом підсилення як частину радіоканалу;
- розробити автоматичний регулятор режиму підсилення радіоканалу.

Викладення основного матеріалу. Аналіз показав, що радіоканал повинен включати автогенератор, амплітудний модулятор, підсилювач потужності, передавальну антену, які розташовуються на мобільній частині агрегату, приймальну антену, вхідний ланцюг, підсилювач високої частоти, підсилювач проміжної частоти, діодний детектор, підсилювач низької частоти, кінцевий пристрій, що знаходяться на нерухомій частині. Всього одинадцять функціональних вузлів, які слід виконувати на напівпровідникових засобах. Радіоканал повинен забезпечувати високу точність передачі амплітуди. Корисний сигнал на агрегатах з обертовими частинами – кульових млинах, спіральних класифікаторах являє собою або гармонічний, або випадковий процес з діапазоном частот від 50 до 250 Гц. Первинні перетворювачі на цих агрегатах розвивають слабкі сигнали і потребують підсилювача змінного струму низьких частот. Зважаючи, що передача радіосигналу здійснюється на дуже незначну відстань, вихідні каскади радіопередавача повинні бути незначної потужності. Крім того, ці агрегати у виробничих умовах знаходяться в оточенні масивного металевого обладнання, що глушить ці радіосигнали. Тому в даній апаратурі можливо не користуватись дозволеними частотами, а використовувати будь-які, оптимальні за змістом задачі. Аналіз показав, що проміжна частота в радіоканалі повинна бути близько 6,5 МГц, а несуча – від 50 МГц.

При амплітудній модуляції в транзисторних пристроях використовують трансформатори для подачі модуляційного сигналу [9, с. 397] з вихідного каскаду підсилювача змінного струму низької частоти первинного перетворювача. Враховуючи, що підсилювачі змінного струму низької частоти мають «завал» частотної характеристики в розглянутому діапазоні, а втрати потужності в постійні трансформатора тим більші, чим вища частота перемагнічувань, у даному підсилювачі необхідно встановлювати коректуючий пристрій для вирівнювання залежності модуляційного сигналу від частоти і недопущення амплітудних викривлень.

Ще одним вузлом, де можуть виникати спотворення сигналу, є діодний детектор. Аналіз показав, що можливо вибором схеми і параметрів діодного детектора звести ці спотворення до мінімуму та отримати достатньо якісний вихідний сигнал радіоканалу.

Одним з базових вузлів у радіоканалі є автогенератор, який характеризують відносною нестабільністю частоти і амплітуди. Сучасні транзисторні автогенератори можна подати у вигляді приладного ряду з 16 основних типів засобів [10]. Точність автогенераторів в ряді від приладу до приладу підвищується, а складність зростає [11]. Найбільш стабільний автогенератор в 12 разів складніший самого простого [10], однак це в основному стосується частоти. На нестабільність амплітуди транзисторні автогенератори в радіотехніці практично не досліджувалися, оскільки вона була другорядним фактором. Амплітудна стабільність автогенераторів порівняно низька і мало покращується при зростанні складності. У радіоканалі, навпаки, частотна стабільність автогенератора виходить на другий план, оскільки вона забезпечує лише нормальне детектування сигналу, а амплітудна стабільність повинна бути високою. Тому необхідну точність в радіоканалі забезпечать достатньо прості автогенератори п'ятого або шостого типу. При цьому можуть бути дещо послабленими вимоги до стабільності окремих вузлів радіоканалу, враховуючи системну стабілізацію його підсилювальних властивостей.

Амплітудна нестабільність в радіоканалі може виникати в будь-якому його функціональному вузлі від автогенератора до підсилювача низької частоти. Тому системна стабілізація підсилювальних властивостей радіоканалу повинна охоплювати усі його функціональні вузли – від автогенератора до підсилювача низької частоти. Компенсацію змінних умов підсилення найкраще здійснювати в підсилювачі низької частоти – на самому виході радіоканалу, варіюючи коефіцієнтом підсилення. В якості регулювального органу можливо застосувати подільник напруги, виконаний на двох

магніторезисторах. Враховуючи характеристики магніторезисторів, необхідно використати обмотку підмагнічування для забезпечення лінійності обраної ділянки і обраного діапазону регулювання опору. Як магніторезистори, так і обмотки підмагнічування в подільнику напруги повинні мати однакові параметри. Крім того, на кожному магніторезисторі слід розташувати по дві однакові робочі обмотки. Одна робоча обмотка повинна вмикатись до джерела струму так, що збільшує опір, а інша – зменшує опір. Таким чином у подільнику напруги досягається диференційна дія керуючого впливу. Одна пара робочих обмоток зменшує, друга – збільшує вихідну напругу подільника.

При системній стабілізації підсилювальних властивостей радіоканалу на його вхід необхідно подавати еталонний сигнал. Для цього можливо автоматично від'єднати первинну обмотку модуляційного трансформатора і приєднати вихід інтегруючого RC-ланцюга, на який подати східчасте діяння. Перехідний процес буде здійснюватись відповідно експонентні, яка в усталеному режимі прийме значення вхідної напруги. Ця стабілізована напруга і буде рівнем еталонного сигналу на вході радіоканалу. Вона створить напругу на виході підсилювача змінного струму радіоприймального пристрою, яка одночасно буде вихідним сигналом радіоканалу. Враховуючи те, що еталонний сигнал, який вводить як корисний у модулятор, відомий, в нерухомій частині радіоканалу можливо створити регулятор, де задавальним діянням буде рівень еталонного сигналу. Різниця між еталонним сигналом (завданням) і вихідною величиною радіоканалу за даних умов створить керуюче діяння, яке можливо використати для встановлення заданого значення коефіцієнта підсилення усього пристрою зміною сили струму у відповідних обмотках підмагнічування магніторезисторів. При цьому в циклі регулювання варіюванням коефіцієнта підсилення вихідна величина радіоканалу приймає значення, яке за даних умов відповідає заданому. Після закінчення циклу регулювання підсилення відбувається переключення на цикл вимірювання корисного сигналу. Автоматичний регулятор при цьому не може впливати на стан радіоканалу, який зберігається впродовж усього терміну вимірювання корисного сигналу. Стабілізація підсилювальних властивостей радіоканалу відбувається перед кожним вимірюванням корисного сигналу.

Похибка замкнених систем автоматичного регулювання в усталеному режимі звичайно знаходиться в межах $\pm (3 \dots 5) \%$, що недопустимо для вимірювального радіоканалу. Однак аналіз показує, що у даному випадку можна забезпечити високу статичну точність керування, використавши автоматичний регулятор з ідеалізованим релейним елементом, реалізованим на контролері [12]. Ідеалізований релейний елемент спрацьовує при занадто низьких рівнях вхідного сигналу і має характеристику без гістерезису, що підвищує якість автоматичного управління. Даний релейний елемент керує зарядом інтегруючого RC-ланцюга. Заряд ємності припиняється, коли різниця в сигналах $U_{вих}$ і $U_{зад}$ складе 1 %.

Для виконання покладених на радіоканал функцій необхідно здійснити циклове керування пристроєм, яке полягає в координації дії окремих його вузлів. Таке керування розповсюджується як на рухоме, так і нерухоме частини пристрою.

Циклове керування відбувається впродовж одного оберту, наприклад барабана кульового млина, з врахуванням зони взаємодії куль і первинного перетворювача датчика завантаження рудою. Його здійснюють після зчитування інформації про завантаження кульового млина рудою. Цикл починається з саморозрядку конденсатора, що підтримує встановлене значення коефіцієнта підсилення, і закінчується зчитуванням інформації про завантаження кульового млина рудою. Наприклад, при здійсненні барабаном 16,5 об/хв. повний цикл триває 3,636 с. Цикл повинен бути узгодженим з положенням перетворювача завантаження кульового млина рудою. Тобто, цикли подачі команд відбуваються у фазі одного оберту барабана кульового млина, починаючи з кінця зони (точка *A*) взаємодії куль зовнішнього шару, що рухається вздовж траєкторії *T*, з первинним перетворювачем *П* (рис. 1). В секторі *AOB* здійснюється саморозрядження ємності інтегруючого RC – ланцюга. В точці *B* необхідно здійснити переключення модулятора високочастотного генератора з прийому сигналу підсилювача первинного перетворювача на прийом еталонного сигналу. Після цього в точці *C* доцільно розпочати підготовку приймача до прийому еталонного сигналу, ввівши заборону зчитування корисної інформації про завантаження кульового млина і дозвіл на прийом еталонного сигналу. Точка *D* відповідає подачі еталонного сигналу на модулятор. В точці *E* після прийому еталонного сигналу необхідно подати команду шляхом комутації на вході підсилювача низької частоти на зміну його коефіцієнта підсилення. Автоматичне регулювання параметра здійснюють в часі, що відповідає сектору *EOK*. В точці *K* автоматичне регулювання обов'язково повинно бути закінченим, а режим підсилювача низької частоти зафіксованим на час, що відповідає сектору *KOA*. В даному проміжку часу здійснюють вимірювання вихідного сигналу первинного перетворювача, що забезпечується поверненням в точці *K* всіх комутуючих пристроїв у вихідне положення. В точці *A* розпочинається новий цикл.

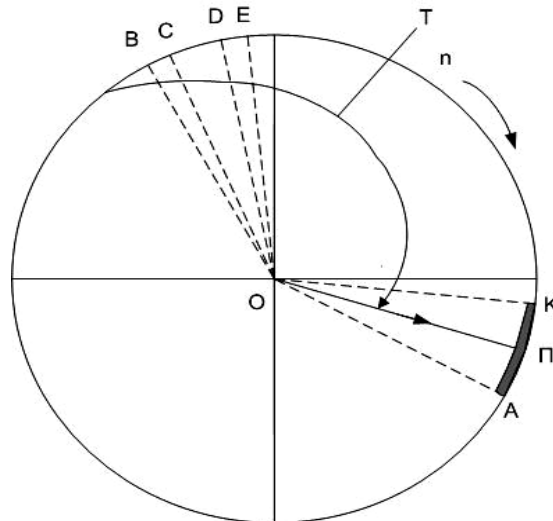


Рис. 1. Принцип побудови колової циклограми керування радіоканалом

На рисунку 1 подано принцип побудови колової циклограми керування радіоканалом, де подачу команд можливо виразити у градусах одного кола. Тут окремі цикли подані довільно, зберігається лише послідовність їх виконання. Для реалізації циклового керування необхідно обґрунтувати величину окремих циклів і фазу початку циклограми.

Зважаючи на те, що точка взаємодії вздовж дуги кола AK первинного перетворювача і куль зовнішнього шару може змінюватися, приймемо розташування точки A під кутом 45° від горизонталі. За таких умов завжди буде гарантована точка взаємодії куль з перетворювачем над поверхнею підстиляючого шару подрібнюючих тіл. В цій точці A ще достатньо точно повинен зберігатися автоматично встановлений режим підсилення низькочастотного сигналу. Його встановлення повинно закінчитися в точці K , яка від горизонталі може бути пониженою десь на 10° , оскільки в такій точці ще гарантовано не може бути взаємодії перетворювача з кулями зовнішнього шару. Таким чином, сектор, де очікується взаємодія куль з перетворювачем, охоплює 35° , що при $16,5$ об/хв. барабана млина відповідає $0,354$ с. Розпочавшись в точці E , в точці K повинен закінчитись процес заряджання ємності інтегруючого ланцюга до заданої напруги, що гарантує встановлення і зберігання заданого коефіцієнта підсилення радіоканалу на час вимірювання.

Запам'ятовувати задане значення напруги будемо на ємності C_3 , яка від джерела напруги U_3 заряджається через ключ і резистор R_3 , а розряджається при розімкненому ключі через вхідний опір $R_{вхл}$ каскаду на польовому транзисторі з емітерним повторювачем. Нехтуючи достатньо великим вхідним опором $R_{вхл}$ каскаду на польовому транзисторі, можливо інтегруючий ланцюг умовно подати без такого опору в процесі заряджання ємності від джерела напруги U_3 . Рахуючи за вхідну величину ланцюга напругу U_3 , а за вихідну – напругу на ємності U_C , для даної схеми можливо записати силу струму в колі залежностями

$$I = \frac{U_3 - U_C}{R_3}; \quad (1)$$

$$I = C_3 \frac{dU_C}{dt}; \quad (2)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) і (2) та здійснивши перетворення, отримаємо:

$$T_3 \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_3; \quad (3)$$

де $T_3 = R_3 C_3$ – постійна часу інтегрувального ланцюга.

З рівняння (3) видно, що воно відповідає аперіодичній динамічній ланці з передавальним коефіцієнтом $K_3 = 1$. Відповідно даному рівнянню здійснюється заряджання ємності C_3 до необхідного значення напруги $U_{сп}$. Постійна часу T_3 характеризує швидкість наростання напруги на ємності. Чим менше значення T_3 , тим більш швидко буде зростати напруга на ємності U_C , однак при цьому і більш швидко ємність буде розряджатись в процесі фіксування необхідного режиму підсилення.

В першу мить після розмикання ключа напруга на ємності $U_{сп}$ залишається незмінною. В процесі розряджання напруга на ємності U_C буде експоненціально зменшуватися

$$U_C = U_{СП} \cdot e^{-\frac{t}{T_p}}; \quad (4)$$

де $U_{СП}$ – початкове значення напруги на ємності перед розрядженням або кінцеве значення напруги на ємності при заряджанні;

$T_p = C_3 R_{\text{всп}}$ – постійну часу розрядження.

В процесі циклового керування необхідно забезпечити практичну незмінність напруги $U_{СП}$ впродовж 0,354 с після закінчення зарядження ємності, а також зарядити її за достатньо короткий відрізок часу. Як видно з (4), розрядження ємності в часі визначається зміною $e^{-\frac{t}{T_p}}$. Аналіз показує, що зміні $U_{СП}$ на 1 % за час 0,354 с відповідає постійна часу $T_p = 35,4$ с. Це можливо при ємності близько 400 мкФ.

Зарядження ємності відповідно рівнянню (3) описується виразом

$$U_C = \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) U_3; \quad (5)$$

Зарядження ємності необхідно здійснювати до встановленого рівня напруги $U_{СП}$. Якщо зарядження повністю розрядженої ємності здійснювати впродовж часу $3T_3$, то перехідний процес практично закінчиться і $U_C \approx U_3$. При $R_3 = 1000$ Ом час такого зарядження при $C_3 = 100$ мкФ буде становити 1,2 с., що не можливо допустити, оскільки це складає третину циклу і при достроковому закінченні процесу встановлення $U_{СП}$ розрядження розпочнеться раніше входження перетворювача в зону вимірювання, яке буде супроводжуватися значними похибками. Найкращі результати вимірювання можна отримати при скороченні часу зарядження ємності і закінчення його якомога ближче до точки K (рис. 1). Ще покращити результати вимірювання можливо перезарядженням ємності до напруги, більшої $U_{СП}$. Це дає можливість у два рази продовжити тривалість стабілізації режиму підсилювача низької частоти у межах заданої похибки або у двічі зменшити ємність C_3 . Одночасно можливо збільшити точність вимірювання параметра, забезпечивши зміну $U_{СП}$ в межах ± 1 %.

Надлишкове зарядження ємності можливо забезпечити наступним чином. Команду на розмикання ключа в колі зарядження подають при $U_C = U_{СП}$, однак контакти розмикаються через певний час. За цей невеликий проміжок часу здійснюється надлишкове зарядження ємності. Приріст напруги ΔU_C залежить як від витримки часу Δt_p на розмикання, так і від зони експоненти, де закінчується зарядження.

Приймемо час зарядження ємності однаковий з часом стабілізації режиму підсилювача низької частоти (близько 0,354 с). Тоді при ємності 400 мкФ і опорі $R_3 = 1000$ Ом постійна часу зарядження ємності складе $T_3 = 0,4$ с. Подамо рівняння (5) у вигляді

$$e^{-\frac{t_3}{T_3}} = 1 - \frac{U_{СП}}{U_3}; \quad (6)$$

де $t_3 = 0,4$ с; $T_3 = 0,4$ с; $U_{СП} = 3$ В, оскільки вхідний сигнал аналого-цифрового перетворювача (АЦП) змінюється в межах 0...3,3 В. З рівняння (6) при прийнятих значеннях параметрів напруга зарядження U_3 складе 4,746 В. Приймемо $U_3 = 5$ В, тоді час зарядження t_3 буде 0,367 с.

Враховуючи, що максимальний час повернення герконів складає 0,3 ... 2,5 мс, відповідно рівнянню (6) визначаємо (при 2,5 мс) напругу на ємності, яка складає 3,0175 В і перевищує встановлений рівень $U_{СП} = 3$ В на 0,58 %. Підбираючи контактні елементи за даним параметром, легко встановити перевищення напруги на ємності на 1 % або дещо більшу величину, зважаючи на те, що після зарядження ще деякий час вимірювання не відбудеться і рівень напруги на ємності буде відхиленням не більше ніж на 1 % від заданого.

При прийнятих тривалостях часових проміжків для зарядження ємності і запам'ятовування режиму підсилювача низької частоти на саморозрядження залишається 2,8 с. Відповідно (4) знаходимо, що за даний тимчасовий проміжок ємність розрядиться лише до рівня напруги, що складе 0,93 $U_{СП}$. Оскільки цього недостатньо, необхідно саморозрядження замінити примусовим розрядженням ємності через невеликий додатковий опір, який підключається окремим контактом. Відповідно залежності (4) такий опір можна знайти з наступних міркувань. Нехай примусове розрядження ємності закінчиться за $6 T_{пр}$, що складає 1,44 с. Тоді при $C_3 = 400$ мкФ з рівняння $t_{пр} = 6 C_3 R_{пр}$ знайдемо опір ланцюга примусового розрядження $R_{пр} = 600$ Ом.

Виконані дослідження дозволяють встановити конкретні тривалості фаз окремих операцій при керуванні радіоканалом, однак для їх реалізації необхідно визначити точку відліку на барабані кульового млина. Це буде точка A на рисунку 1. Причому відлік початку циклу необхідно здійснювати як на рухомій, так і на нерухомій частині агрегату. Це здійснимо за допомогою герконів з постійними магнітами. Відлік початку циклу на барабані (рухомій частині агрегату) можливо здійснити встановленням геркону на барабані млина або кришці люка, який взаємодіє з постійним магнітом,

встановленим на стояці біля барабана млина. Відлік початку циклу на нерухомій частині агрегату можна здійснювати встановленням постійного магніту на барабані млина, а геркону – на нерухомому стояці. Дані контакти дозволяють зафіксувати початок циклу керування в радіоканалі.

Відповідно з викладеним побудовано циклограму пристрою автоматичного керування радіоканалом (рис. 2). Як видно з рисунку 2, для забезпечення функціонування радіоканалу необхідно реалізувати керуючий пристрій з рядом контактів. Одна частина керуючого пристрою буде розташована на обертовій, а інша – на нерухомій частині агрегату. Керуючий пристрій необхідно розглядати як одне ціле з функціональними вузлами радіоканалу.

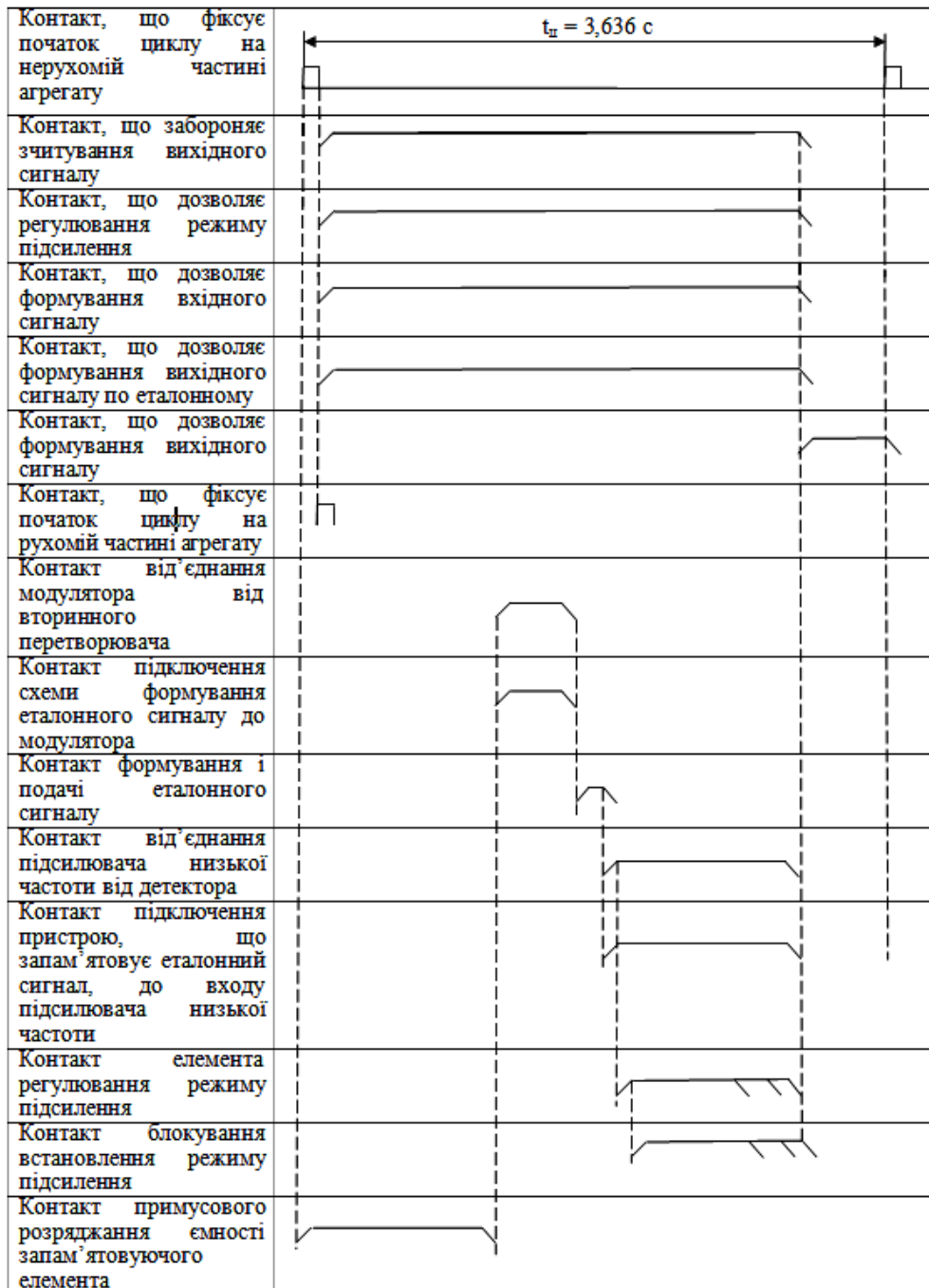


Рис. 2. Циклограма керуючого пристрою радіоканалу

Функціональна схема мобільної частини радіоканалу подана на рисунку 3. Контакт, що фіксує початок циклу на рухомій частині агрегату, при замиканні запускає таймер 1 з тривалістю часу, яка відповідає моменту початку комутації входу модулятора. Після закінчення даного часового проміжку спрацьовує таймер 2, який забезпечує тривалість часу, необхідну для від'єднання ключем 1 підсилювача змінної напруги і підключення до схеми формування еталонного сигналу входу модулятора. Це забезпечується контактами ключа 1. Напруга еталонного джерела подається за допомогою контакту

ключа 2, який замикається на проміжок часу, визначений таймером 4, з розривом у часі на певну величину після замикання контактів ключа 1, що визначається таймером 3. Еталонний сигнал модулює високочастотні коливання, що випромінюються передавальною антенною.

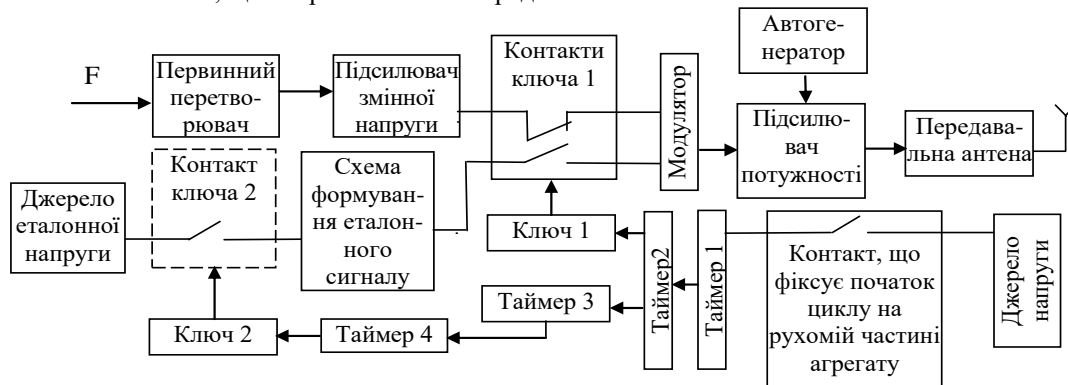


Рис. 3. Функціональна схема мобільної частини радіоканалу

Високочастотний сигнал передавача сприймається приймальною антенною приймача (рис. 4). Він підсилюється у високочастотному тракті і на детекторі виділяється модуляційний сигнал. Еталонний модуляційний сигнал АЦП з динамічною компенсацією 1 перетворюється у постійну величину. АЦП1 запам'ятовує найбільше значення амплітуди еталонного сигналу, що діє на вході масштабуючого підсилювача постійного струму. Одночасно еталонний сигнал діє на вхід підсилювача змінного струму, який складено з модулятора, двох підсилювачів змінного струму, двох емітерних повторювачів, подільника напруги, демодулятора і АЦП з динамічною компенсацією 2. Подільник напруги є регульовальним органом складеного підсилювача змінного струму, а як наслідок, і радіоканалу. АЦП з динамічною компенсацією 2 запам'ятовує вихідний сигнал демодулятора, що є регульованою величиною, в режимі налагоджування.

В складеному підсилювачі змінного струму здійснюють циклове керування. При підході постійного магніту, закріпленого на барабані кульового млина, до контакту на стояку, що фіксує початок циклу на нерухомій частині радіоканалу, спрацьовує ключ 3 і запускається таймер 7 (рис. 4), який через встановлену витримку часу повертає систему у вихідне положення. При спрацюванні ключа 3 окремим нормально замкненим контактом здійснюється заборона на зчитування інформації, двома контактами надається дозвіл на роботу обох АЦП (вони замикаються), а через замкнений четвертий контакт виділений демодулятором імпульс еталонного сигналу запускає таймер 5, який має витримку часу, необхідну для фіксування сигналів АЦП.

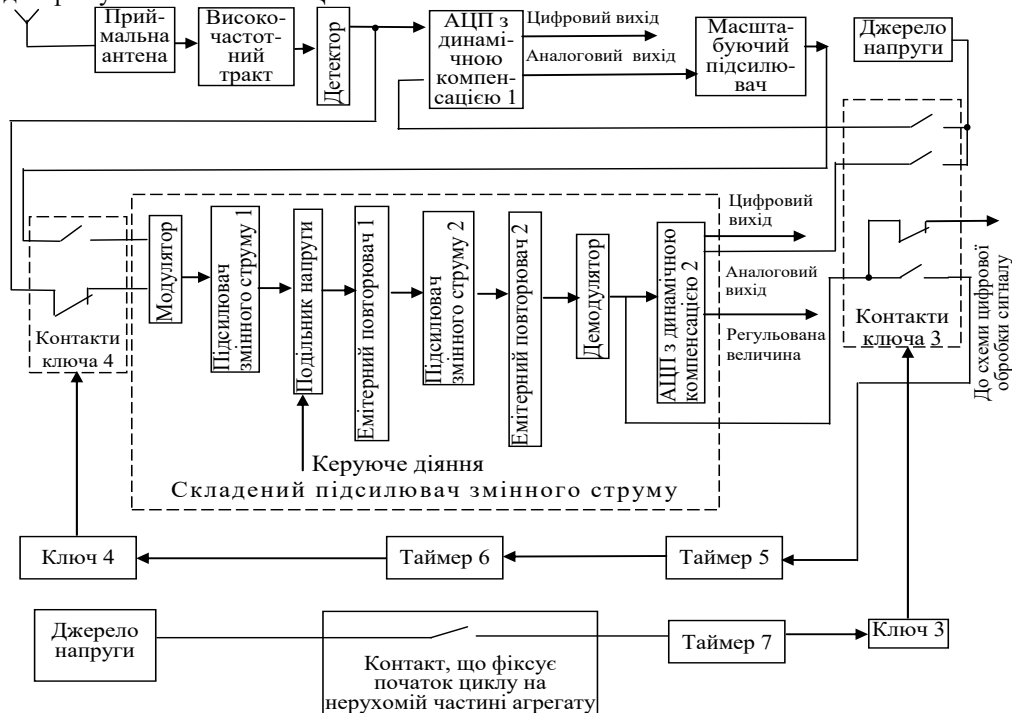


Рис. 4. Функціональна схема приймача зі складеним підсилювачем змінного струму та регульовальним органом, який розміщено на нерухомій частині агрегату

Через дану витримку часу запускається таймер 6, спрацьовує ключ 4, перемикаючи свої контакти. При цьому вихід детектора від'єднується від модулятора, а вхід модулятора з'єднується з аналоговим виходом АЦП1 через масштабуючий підсилювач. Витримка часу таймера 6 відповідає часовому проміжку, необхідному для здійснення автоматичного регулювання підсилення в радіоканалі. Через даний проміжок часу схема повертається у вихідне положення. Детектор з'єднується з входом модулятора, а при відпусканні контактів ключа 3 з обох АЦП списуються прийняті сигнали (вони переводяться при розмиканні контактів ключа 3 у вихідне положення), демодулятор від'єднується від таймера 5 і з'єднується з ланцюгом передачі інформації до схеми цифрової обробки сигналу. Схема підготовлена до вимірювання вихідного сигналу первинного перетворювача. Приймач радіоканалу розміщено на нерухомій частині агрегату.

Необхідний режим підсилення в радіоканалі встановлює автоматичний регулятор (рис. 5). При замиканні контакту, що фіксує початок циклу на нерухомій частині агрегату, спрацьовує ключ 5 на проміжок часу, який визначається витримкою таймера 8. Спрацювання ключа 5 забезпечує замикання його контактів у ланцюгах розрядження ємностей C_{31} і C_{32} через резистори R_{P1} і R_{P2} . За час витримки таймера 8 ємності повністю розряджаються, точніше одна з них, яка була перед цим заряджена. Через проміжок часу, встановлений на таймері 8, регульована величина з виходу АЦП2 (рис. 4) поступає на вхід цифрового контролера (рис. 5) і з великою точністю порівнюється з напругою задавача еталонного сигналу. В залежності від результату порівняння на виході цифрового контролера формується дискретний сигнал прямої або оберненої полярності. При цьому на виході емітерних повторювачів 3 або 4 виникає сигнал, що приводить до спрацювання ключа 6 чи ключа 7 і відповідного перемикання їх контактів. Якщо, наприклад, спрацює ключ 6, то його нормально замкнений контакт розімкнеться, а нормально розімкнений контакт замкнеться. В результаті від джерела стабілізованої напруги через резистор

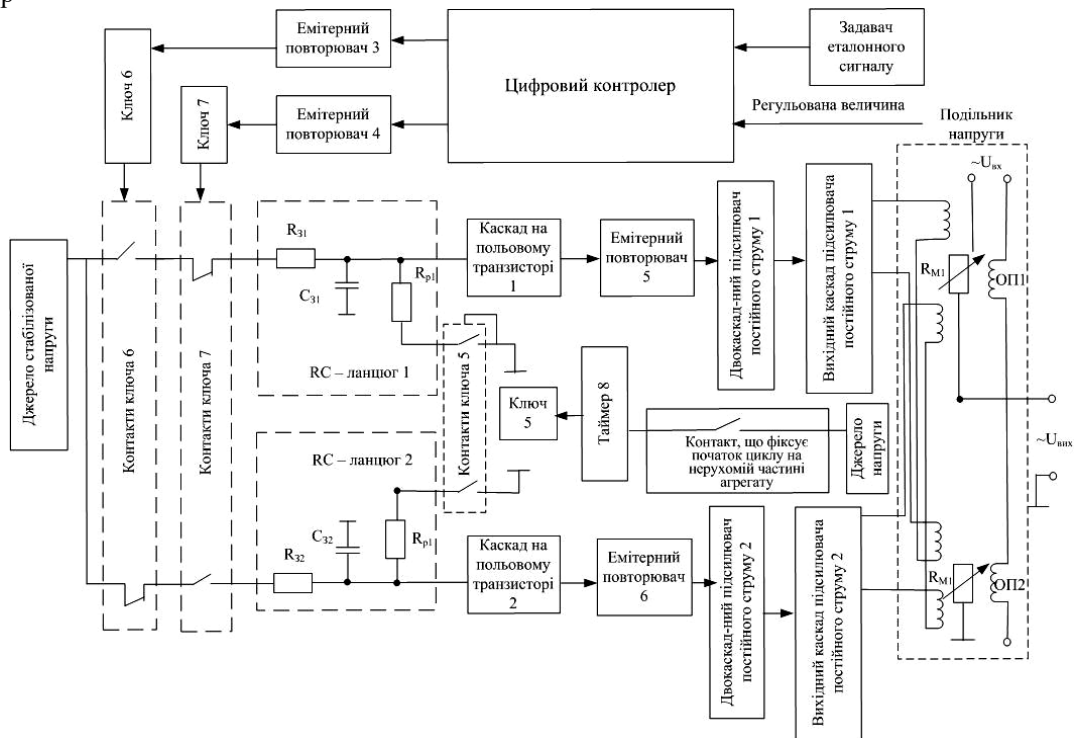


Рис. 5. Функціональна схема автоматичного регулятора режиму підсилення радіоканалу

R_{31} почне заряджатися ємність C_{31} . Одночасно з цим в складеному підсилювачі змінного струму (рис. 4) замикається контакт, що з'єднує масштабуючий підсилювач з входом модулятора. Вхідний сигнал складеного підсилювача змінного струму, що сформований АЦП1 (рис. 4), характеризує стан радіоканалу, оскільки на його величину впливали передавальні властивості всіх вузлів при еталонному діянні на вході. При змінених властивостях радіоканалу даний вхідний сигнал складеного підсилювача змінного струму не відповідає рівню еталонного діяння в даній точці, але відомим є нормований вхідний сигнал АЦП2 (рис. 4), який повинен відповідати задавальному діянню на вході цифрового контролера. Відновивши вихідний сигнал АЦП2 до нормативного значення при даному рівні сигналу на вході модулятора, забезпечимо задані передавальні властивості всього радіоканалу.

Зміна коефіцієнта підсилення радіоканалу відбувається подільником напруги на магніторезисторах R_{M1} і R_{M2} , які підмагнічуються обмотками ОП1 і ОП2 таким чином, щоб працювати на лінійній ділянці характеристики. Тому під впливом обмоток підмагнічування опори магніторезисторів однакові і

вихідний сигнал $U_{вих}$ дорівнює $0,5 U_{вх}$. У такому режимі при дії еталонного сигналу на вході радіоканалу і заданих його параметрах на виході складеного підсилювача змінного струму отримуємо нормований рівень напруги. Такий стан відрізняється тим, що ключі 6 і 7 не спрацьовують і керуючі обмотки магніторезисторів обезструмлені. Якщо такої відповідності на вході цифрового контролера не існує, то спрацює один з ключів 6 або 7 в залежності від знаку небалансу вхідних сигналів автоматичного регулятора. При спрацюванні ключа 6 почне заряджатись ємність C_{31} , її вихідна напруга в часі зростає і передається через каскад на польовому транзисторі та емітерний повторювач на вхід підсилювача постійного струму, навантаженням якого є обмотки управління магніторезисторів. У другому каналі буде заряджатись ємність C_{32} , створюючи зворотний ефект на подільник напруги. При зростанні напруги на ємності C_{31} або C_{32} збільшується вплив на подільник напруги, що призводить до зміни регульованої величини. У мить, коли регульована величина досягає заданого рівня на виході цифрового контролера зникає керуюче діяння і процес автоматичного регулювання припиняється. Оскільки вхідний опір каскаду на польовому транзисторі достатньо великий, напруга на елементі запам'ятовується на тривалий час. Після встановлення необхідного коефіцієнта підсилення складеного підсилювача змінного струму ключами 3 і 4 переключаються контакти. Цим знімається заборона на зчитування інформації з виходу демодулятора і вхід модулятора під'єднується до виходу детектора. Радіоканал готовий до прийому корисного сигналу. Однак АЦП цей сигнал не фіксують, оскільки контакти, що надають дозвіл на таку операцію, розімкнуті. Це забезпечує проходження на вихід корисного сигналу при нормативному підсиленні в радіоканалі.

Найбільш складним випадком при передачі сигналів є випадковий процес. Для випробування радіоканалу було виготовлено стенд, що являв собою обід діаметром 4 м з системою спиць, закріплених на втулці. Втулка монтувалася і жорстко закріплювалася на валу, який був з'єднаний через редуктор з електродвигуном, що забезпечувало швидкість обертання 16,5 об/хв. На ободі кріпилася рухома частина радіоканалу з підсилювачем, первинним перетворювачем та джерелом живлення. На виході первинного перетворювача формувался вихідний сигнал, що являв собою випадковий процес, який підсилювався підсилювачем змінного струму з коректуючим пристроєм. Цей вихідний корисний сигнал з підсилювача змінного струму у фазах вимірювання подавався на первинну обмотку вхідного трансформатора модулятора. Його фіксували при взаємодії з подрібненим матеріалом впродовж руху на ділянці, що відповідала дузі AK (рис. 1).

Реалізації випадкових процесів подано на рисунку 6. З нього видно, що реалізації достатньо добре співпадають, однак на виході складеного підсилювача змінного струму вершини викидів дещо згладжені. Обробка отриманих реалізацій випадкового процесу показала, що їх дисперсії $\sigma_{\xi a}^2 = 1,8585$ ум.од., $\sigma_{\xi b}^2 = 1,8489$ ум.од., число додатних викидів за нульовий рівень $N_a = 4$, $N_b = 4$, а спектральні густини займають діапазон від 50 до 250 Гц. Отже, випадкові сигнали достатньо точно передаються даним радіоканалом.

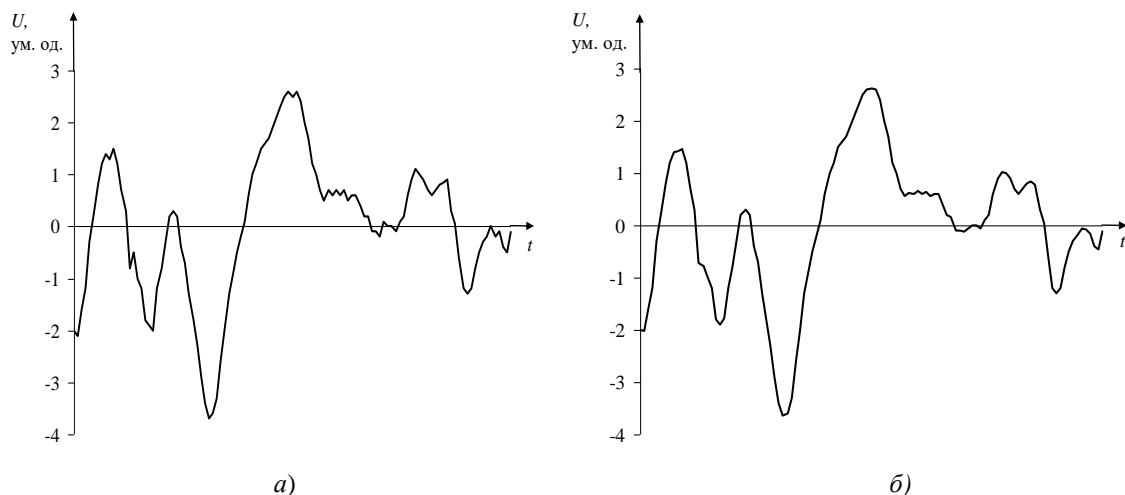


Рис. 6. Реалізації випадкових сигналів на вході модулятора (а) і на виході підсилювача змінного струму (б)

Висновки та перспективи подальших розвідок. Таким чином, створено радіоканал для передачі корисних сигналів з обертових частин агрегатів на нерухомі, який містить автогенератор, амплітудний модулятор, підсилювач потужності, передавальну антену, приймальну антену, вхідний ланцюг, підсилювач проміжної частоти, діодний детектор, підсилювач низької частоти, кінцевий пристрій. Він

включає мобільний блок, розташований на обертовій частині агрегату, та нерухомий, до якого входять радіоприймач та автоматичний регулятор. Система циклового керування об'єднує дві ці частини радіоканалу. Традиційно в радіоапаратурі основною задачею було досягнення стабільності частоти. Оскільки в будь-якому функціональному вузлі радіоканалу може з'явитись амплітудна нестабільність, перш за все розв'язувалась задача підвищення точності передачі амплітуди сигналів. Амплітудна стабільність досягалась шляхом подачі еталонного сигналу на вході модулятора високочастотних коливань, прийому його і порівняння з заданим значенням. Автоматичний регулятор на цифровому контролері порівнював ці сигнали і у випадку їх неспівпадіння формував керуюче діяння на зміну коефіцієнта підсилення вихідного вузла радіоканалу до встановлення його заданого значення незалежно від причин, які його відхилили. Після його запам'ятовування через радіоканал пропускався корисний сигнал. Було використано випадковий сигнал як найбільш складний. Перевірка радіоканалу підтвердила високе співпадіння випадкових сигналів на вході модулятора передавача і на виході складеного підсилувача змінного струму. Дисперсії вхідного $\sigma_{\xi_a}^2 = 1,8585$ ум.од., вихідного сигналів $\sigma_{\xi_b}^2 = 1,8489$ ум.од., число додатних викидів відповідно дорівнюють $N_a = 4$, $N_b = 4$, а спектральні густини займають діапазон в основному від 50 до 250 Гц, що підтверджує високу точність передачі випадкових процесів через радіоканал.

Наукова новизна досліджень полягає в тому, що вперше розроблено радіоканал такого типу, який забезпечує високі якісні показники. Практична цінність зв'язана з тим, що відкривається перспектива вимірювання важливих технологічних параметрів безпосередньо в агрегатах, де відбуваються різні фізичні процеси.

Перспективою подальших досліджень є розробка первинних перетворювачів технологічних параметрів і систем автоматичного керування інноваційними процесами в технологічних агрегатах.

Список використаної літератури:

1. Измельчение. Энергетика и технология / Г.Г. Пивняк, Л.А. Вайсберг, В.И. Кириченко и др. – М. : Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. – 296 с.
2. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / А.І. Купін. – Кривий Ріг : Видавництво КТУ, 2008. – 204 с.
3. Кондратець В.О. Ідентифікація завантаження кульового млина рудою по параметрам енергетичної ефективності руйнування матеріалу / В.О. Кондратець, М.О. Карчевська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2011. – № 5. – С. 9–13.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н.Н. Иващенко. – М. : Машгиз, 1962. – 628 с.
5. Аксенов В.В. Помехоустойчивость радиоканала связи с удаленными стационарными объектами / В.В. Аксенов, В.И. Павлов // Вестник ТГТУ. – Томск, 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 922–926.
6. Гринман И.Г. Измерение степени загрузки мельниц рудой с помощью телеизмерительного датчика / И.Г. Гринман, Ж.М. Сакбаев, Ж.Р. Жотабаев // Обогащение руд. – Москва. – 1969. – № 1. – С. 27–29.
7. Пожарский Ю.М. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий / Ю.М. Пожарский, Д.А. Полеценко, И.Ю. Подковыров // ГИАБ. – Москва. – 2013. – № 2. – С. 249–254.
8. А. с. 1755922 А1 (СССР), МКИ В 02 С 25/00. Экспериментальный анализатор внутримельничного заполнения / Б.С. Бейсенов, В.С. Проходцев, А.С. Проходцев, Д.З. Иссатова (СССР). – № 4797606/33 ; заявл. 01.03.90 ; опубл. 23.08.92, Бюл. № 31.
9. Каганов В.И. Транзисторные передатчики / В.И. Каганов. – М. : Энергия, 1976. – 448 с.
10. Кондратець В.О. Дослідження транзисторних автогенераторів як коливальних систем, що складнішають / В.О. Кондратець // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КДТУ. – 2001. – № 8. – С. 102–108.
11. Кондратець В.О. Теоретичні дослідження стабільності транзисторних автогенераторів в процесі структурного удосконалення / В.О. Кондратець // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград : КДТУ. – 2001. – № 31. – С. 81–84.
12. Кондратець В.О. Дослідження нелінійної системи автоматичного управління подачею води у кульовий млин, що подрібнює піски класифікатора / В.О. Кондратець, А.М. Мацуї // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград : КНТУ. – 2013. – № 26. – С. 161–168.

References:

1. Pivnyak, G.G., Vaisberg, L.A., Kirichenko, V.I. and others (2007), *Izmel'chenie. Energetika i tekhnologiya*, Izd. dom «Ruda i Metally», Moscow, 296 p.
2. Kupin, A.I. (2008), *Intelektual'na identyfikacija ta keruvannja v umovah procesiv zbagachuval'noi' tehnologii'*, Vydavnyctvo KTU, Kryvyj Rig, 204 p.
3. Kondratec', V.O. and Karchevs'ka, M.O. (2011), «Identifikacija zavantazhennja kul'ovogo mlyna rudoju po parametram energetychnoi' efektyvnosti rujnuvannja materialu», *Visnyk Vinnyc'kogo politehnic'nogo instytutu*, No. 5, pp. 9–13.

4. Ivashchenko, N.N. (1962), *Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriya i elementy system*, Mashgiz, Moscow, 628 p.
5. Aksenov, V.V. and Pavlov, V.I. (2011), «Pomekhoustoichivost' radiokanala svyazi s udalennymi statsionarnymi ob"ektami», *Vestnik TGTU*, Vol. 17, No. 4, pp. 922–926.
6. Grinman, I.G., Sakbaev, Zh.M. and Zhotabaev, Zh.R. (1969), «Izmerenie stepeni zagruzki mel'nits rudoi s pomoshch'yu teleizmeritel'nogo datchika», *Obogashchenie rud*, No. 1, pp. 27–29.
7. Pozharskii, Yu.M., Poleshchenko, D.A. and Podkovyrov, I.Yu. (2013), «Opredelenie stepeni zapolneniya mel'nitsy mokrogo samoizmel'cheniya s primeneniem besprovodnykh tekhnologii», *GIAB*, No. 2, pp. 249–254.
8. Beisenov, B.S., Prokhodtsev, V.S., Prokhodtsev, A.S. and Igsatova, D.Z. (1992), *Ekspperimental'nyi analizator vnutrimel'nichnogo zapolneniya*, A.s. 1755922 A1 (SSSR), MKI V 02 S 25/00, zajavl. 01.03.90, opubl. 23.08.92, Byul. No. 31.
9. Kaganov, V.I. (1976), *Tranzistornye peredatchiki*, Energiya, Moscow, 448 p.
10. Kondratec', V.O. (2001), «Doslidzhennja tranzystornyh avtogeneratoriv jak kolyval'nyh system, shho skladnishajut'», *Tehnika v sil'skogospodars'komu vyrobnyctvi, galuzeve mashynobuduvannja, avtomatyzacija*, No. 8, pp. 102–108.
11. Kondratec', V.O. (2001), «Teoretychni doslidzhennja stabil'nosti tranzystornyh avtogeneratoriv v procesi strukturnogo udoskonalennja», *Konstruvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'skogospodars'kyh mashyn*, No. 31, pp. 81–84.
12. Kondratec', V.O. and Macuj, A.M. (2013), «Doslidzhennja nelinijnoi' systemy avtomatycznogo upravlinnja podacheju vody u kul'ovyj mlyn, shho podribnjuje pisky klasyfikatora», *Tehnika v sil'skogospodars'komu vyrobnyctvi, galuzeve mashynobuduvannja, avtomatyzacija*, No. 26, pp. 161–168.

Мацуй Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- автоматика.

E-mail: matsuyan@mail.ru.

Кондратець Василь Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- автоматика.

E-mail: kondratetsva@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2018.