

УДК 004.032.26

О.К. КОЛЕСНИЦЬКИЙ, С.М. ПАВЛОВ, І.В. БОКОЦЕЙ, Г.О. КОЛЕСНИЦЬКА

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙРОЕЛЕМЕНТА НА ТИРИСТОРІ

Анотація. Запропоновано структурну схему реалізації імпульсної моделі нейрона. Згідно цієї схеми розроблено імпульсний нейронний елемент на тиристорі, який має велику навантажувальну спроможність, що дає змогу використовувати його для побудови компактних реалізацій імпульсних нейронних мереж на основі матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Наведено дані експериментальних досліджень цього нейроелемента та шляхи подальшого вдосконалення.

Ключові слова: імпульсний нейрон, тиристор, імпульсні нейронні мережі, апаратна реалізація, експериментальні дослідження.

Аннотация. Предложена структурная схема реализации импульсной модели нейрона. Согласно этой схеме разработан импульсный нейронный элемент на тиристоре, который имеет большую нагрузочную способность, что дает возможность использовать его для построения компактных реализаций импульсных нейронных сетей на основе матриц светодиодов или полупроводниковых лазеров. Приведены данные экспериментальных исследований этого нейроэлемента и пути дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: импульсный нейрон, тиристор, импульсные нейронные сети, аппаратная реализация, экспериментальные исследования.

Annotation. The structure diagram of pulsed neuron model implementation is proposed. The thyristor based pulsed neural element is developed according to this structure diagram. This neural element has a big load-driving capability, that gives a possibility to use it when compact pulsed neural network constructing on the base of LED arrays or semiconductor laser diode arrays. Experimental research data and future enhancement directions of the neural element are presented.

Keywords: pulsed neuron, thyristor, pulsed neural network, hardware implementation, experimental research.

Вступ

Останнім часом штучні нейронні мережі (ШНМ) все частіше використовують в системах штучного інтелекту для розпізнавання складних динамічних образів, прогнозування багатопараметричних процесів, підтримки прийняття рішень в складних системах управління за умов невизначеності та при розв'язанні інших складних когнітивних задач, де традиційні комп'ютерні системи, що працюють за чіткими алгоритмами та програмами, виявляються неефективними [1, 2]. Однак поки що більшість практичних застосувань нейромережових систем реалізується програмно (у вигляді комп'ютерних моделей) або програмно-апаратно (у вигляді спеціальних плат у складі традиційних комп'ютерів та програмного забезпечення для них) [1, 2].

Актуальність

Програмні та програмно-апаратні реалізації ШНМ характеризуються невеликою кількістю нейронів і використовують доволі спрощені моделі біологічних нейронів (не відтворюється велика кількість функцій нейрона), що не дозволяє досліджувати та моделювати за їх допомогою принципи роботи мозку людини для використання отриманих знань при створенні систем штучного інтелекту. Саме тому актуальною задачею є створення апаратних реалізацій нейроелементів, які відтворювали б якомога більше функцій біологічного нейрона та були б при цьому максимально простими апаратно. Саме цим критеріям відповідають імпульсні нейроелементи [2-4], в яких інформація представляється, так само як і в біологічних нейронах, частотою імпульсів. Але мало створити апаратний нейрон, потрібно, щоб він мав засоби для зручного з'єднання з великою кількістю інших нейронів. Зручність між'єднань забезпечується при використанні оптичних сигналів як носіїв інформації, тому створювані імпульсні нейроелементи мають бути оптоелектронними. Крім цього, як показано в роботі [5], для зменшення масо-габаритних показників нейромереж, імпульсні нейроелементи повинні мати велику навантажувальну спроможність, щоб керувати одразу рядком (стовпчиком) матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів.

Мета

Мета цієї статті - висвітлити запропоновану авторами апаратну реалізацію імпульсного нейрона на основі тиристора, навести результати його експериментальних досліджень, провести аналіз досяжних параметрів та характеристик, визначити напрямки подальших досліджень.

Постановка задачі

Необхідно створити апаратні реалізації імпульсної моделі нейрона (імпульсні нейроелементи), які повинні мати оптичні входи-виходи для забезпечення зручності між'єднань в мережі та повинні мати велику навантажувальну спроможність, щоб керувати одразу рядком (стовпчиком) матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів та експериментально дослідити їх експлуатаційні параметри та характеристики..

Розв'язання задач

1. Імпульсна модель нейрона

У відомих нейроелементах [3] інформаційним носієм можуть бути: цифрові коди, часові інтервали, струм, напруга, імпульсні сигнали. Як відомо з фізіології, в нейронах мозку інформація передається в імпульсній формі, тому саме імпульсні моделі нейрона є найбільш адекватними до біологічних нейронів і їх дослідження є вельми актуальною задачею.

При розробці структурної схеми імпульсної моделі нейрона потрібно виконати наступні вимоги:

1) імпульсна модель нейрона по набору своїх функцій повинна бути максимально адекватною біологічному нейрону;

2) з урахуванням подальшого використання в оптоелектронних нейронних мережах, де сигнали між нейронами передаються в оптичному вигляді, імпульсна модель нейрона повинна мати оптичні входи і виходи;

3) оскільки вхідні сигнали нейронів повинні інтегруватись (додаватись) в нейроні, то в якості такого інтегратора доцільно взяти електричну ємність;

4) для виконання порогової обробки накопичених вхідних сигналів, в схемі імпульсної моделі нейрона має бути пороговий пристрій;

5) для формування вихідного імпульсу певної тривалості має бути коло розряду інтегратора (ємності).

На рис. 1 наведено структурну схему реалізації імпульсної моделі нейрона.

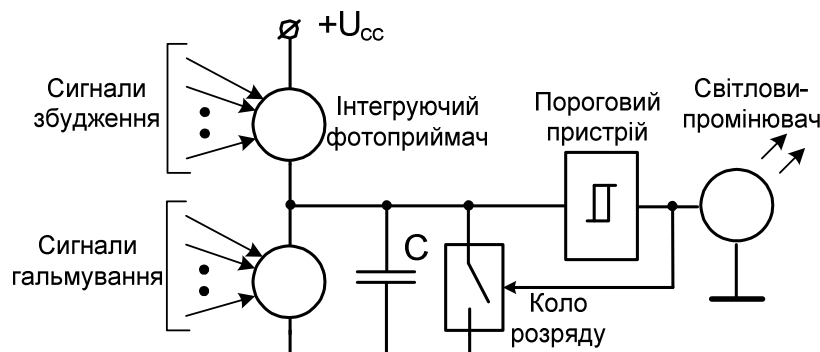


Рисунок 1 – Структурна схема реалізації імпульсної моделі нейрона

Вона має оптичні входи (збуджувальні та гальмівні), які подаються на відповідні фотоприймачі. Алгебраїчна сума фотострумів з цих фотоприймачів інтегрується на ємності C . При досягненні різниці потенціалів на ємності порогової величини, спрацьовує пороговий пристрій, формуючи на своєму виході передній фронт вихідного імпульсу. По цьому передньому фронту включається коло розряду ємності, від параметрів якого залежить тривалість вихідного імпульсу. Для забезпечення оптичного виходу, в схему введено світлопроміньовач.

Пороговий пристрій може бути реалізований на різних елементах. Це можуть бути напівпровідникові прилади з ділянкою від'ємного опору на ВАХ: тиристри, тунельні діоди, одноперехідні транзистори, біспін-прилади [2]; а також напівпровідникові прилади з пороговими властивостями: лавинний транзистор, стабілітрон; порогові схеми на біполярних або МОН-транзисторах зі зворотними зв'язками. В цій статті пропонується реалізація імпульсної моделі нейрона з пороговим пристроєм на тиристорі [4].

2. Апаратна реалізація імпульсної моделі нейрона на тиристорі

Для апаратної реалізації структурної схеми імпульсної моделі нейрона (див. рис. 1), було обрано варіант виконання порогового пристрою на основі тиристора. Цей вибір визначається тим, що тиристор може керувати (перемикати) великими струмами. Саме ця властивість необхідна для того, щоб нейроелемент міг керувати одразу лінійкою матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Маючи такі нейроелементи, можна будувати апаратні реалізації нейронних мереж на основі матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів у вигляді «сендвіч-структур» [4] з покращеними масо-габаритними показниками.

Прототипом запропонованому нейроелементу на тиристорі є пристрій [6], який містить просторово-часовий суматор вхідних сигналів (виконаний на конденсаторі), генератор імпульсів на тиристорі з резистивно-ємнісними ланками в катодному та анодному ланцюгах. Крім того, пристрій містить розділювальні напівпровідникові діоди та резистор для встановлення режиму роботи пристрою (режими очікування або спонтанної активності). Недоліком даного пристрою є електрична природа вхідних та

вихідних сигналів (що ускладнює технологію побудови на таких елементах нейронних мереж з великою кількістю міжз'єднань) та відсутність гальмівних входів (що обмежує функціональні можливості пристрою). Задачею вдосконалення пристрою для моделювання нейрона (нейроелемента) [6] було забезпечення можливості пристрою працювати з оптичними сигналами та наявність як збуджувальних, так і гальмівних входів, що розширює функціональні можливості пристрою.

На рис. 2 наведено схему запропонованого [4] нейроелемента. Нейроелемент містить перший VD1 та другий VD2 фотодіоди, конденсатор C1 для просторово-часового підсумовування, генератор імпульсів, що виконаний на тиристорі VS1 з резистором R3, світловипромінювачем VD3 та конденсатором C2 в катодному ланцюгу і резистором R2 та конденсатором C3 в анодному ланцюгу, резистор R1 для встановлення режиму роботи нейроелемента (очікування або фонові активності), електричний вихід та оптичний вихід (на VD3), а також збуджувальний (на VD1) та гальмівний (на VD2) входи нейроелемента.

Нейроелемент працює таким чином. Перший фотодіод VD1 приймає збуджувальні вхідні оптичні сигнали, які перетворюються фотодіодом в струм, що заряджає конденсатор C1. Другий фотодіод VD2 приймає гальмівні вхідні оптичні сигнали, які перетворюються фотодіодом VD2 в струм, що розряджає конденсатор C1. Напряга живлення тиристора менша напруги його перемикавання при струмі керуючого електрода, що регулюється резистором R1 (в режимі очікування). Коли напруга на керуючому електроді тиристора під дією вхідних імпульсів досягне порогового значення (при даній напрузі живлення), тиристор відкривається, на резисторі R3 і світловипромінювачі VD3 створюється вихідний позитивний імпульс напруги, який надходить на електричний вихід (світловипромінювач VD3 формує в цей час вихідний оптичний імпульс). Конденсатор C3 розряджається через відкритий тиристор, резистор R3 і світловипромінювач VD3, напруга на аноді тиристора зменшується і він закривається. Конденсатор C2, що зарядився під час відкритого стану тиристора, розряджається через резистор R3 і світловипромінювач VD3, формуючи задній фронт вихідного імпульсу. Після замикавання тиристора конденсатор C3 заряджається від джерела напруги через резистор R2 до початкового значення, моделюючи фазу пониження збудження (відносна рефрактерність).

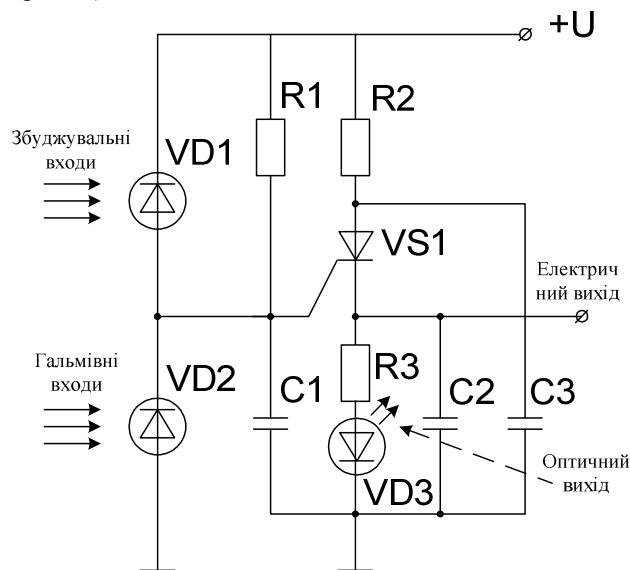


Рисунок 2 – Нейроелемент на тиристорі

Завдяки наявності оптичних входів та виходів даний нейроелемент може легко використовуватись при побудові імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних зв'язків за допомогою оптичних та голографічних засобів. Крім того, завдяки тому, що тиристор може перемикає великі струми, як світловипромінювач VD3 може використовуватись кілька паралельно з'єднаних світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Це дає змогу навантажувати нейроелемент на цілий рядок або стовпчик матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів, що спрощує структуру побудови великих нейронних мереж, де один нейрон повинен передавати свій вихідний сигнал на всі інші нейрони. Наявність в запропонованому нейроелементі крім збуджувальних також і гальмівних входів підвищує адекватність нейроелемента своєму біологічному прототипу та дозволяє організовувати нейронні мережі як з додатними, так і з від'ємними коефіцієнтами синаптичних зв'язків (що розширює функціональні можливості).

Якщо як тиристор використати світловипромінюючий тиристор, то тоді світловипромінювач VD3 можна виключити зі схеми, а оптичним виходом нейроелемента буде апертура світловипромінюючого тиристора.

3. Експериментальні дослідження імпульсного нейроелемента на тиристорі

Для експериментальної перевірки працездатності запропонованого нейроелемента був зібраний експериментальний макет, схема якого показана на рис. 3. За допомогою фотодіодних оптопар VU1 і VU2 (тип АОД109Б) моделювалася дія оптичних потужностей $P_{зб}$ і $P_{глім}$ відповідно збуджувальних та гальмівних вхідних оптичних сигналів нейрона. За допомогою джерел постійної напруги G1 і G2 (Б5-49), а також резисторів R1 і R2 змінювався струм в колі світлодіодів оптопар. Струм світлодіодів оптопар контролювався мікроамперметром (вольтметр універсальний В7-21а — на схемі рис. 3 не показаний).

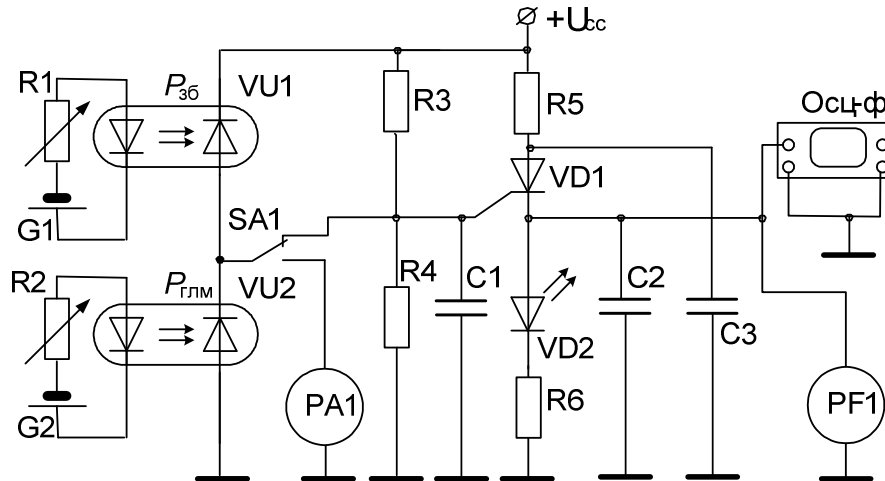


Рисунок 3 – Схема експериментального макету для дослідження імпульсного нейроелемента на тиристорі

Перемикач SA1 служить для перемикання нейроелемента з режиму вимірювання сумарного фотоструму фотодіодів оптопар (на мікроамперметрі PA1 — вольтметр універсальний В7-21а) у робочий режим. У робочому режимі вихідні імпульси контролювалися за допомогою осцилографа (C1-93), а їх частота вимірювалася за допомогою частотоміра PF1. Параметри схеми: $C1=C2=C3=0,01$ мкф, $R5=1$ кОм, $R6=1$ кОм, VD1 – тиристор КУ112А, VD2 – світлодіод АЛ307Б.

Експериментальні дослідження нейроелемента проводилися таким чином. Напруга живлення складала $U_{cc}=12$ В. Резистори R3 та R4 підбирались так, щоб при відсутності вхідних сигналів на виході нейроелемента спостерігалась нестійка імпульсація. Наприклад, при $R3=34$ кОм, імпульсація починалась при $R4=11,5$ кОм і закінчувалась при $R4=16,9$ кОм (тиристор переходив у відкритий стан). Було проведено 2 експерименти для 2 фіксованих значень оптичної потужності на гальмівному вході $P_{глім}$ (фіксовані значення оптичної потужності відповідають таким фотострумам: $I_{глім1}=0$, $I_{глім2}=100$ мкА). У кожному з 2 експериментів оптична потужність $P_{зб}$ на збуджувальному вході змінювалася від 0 до 580 мкВт (що відповідає зміні фотоструму $I_{зб}$ через фотодіод оптопар VU1 від 0 до 310 мкА). Графіки цих залежностей представлені на рис. 4.

Логічно виникло питання: як впливають номінали R3 та R4 на діапазони вхідних фотострумів, вихідних частот та параметри вихідних імпульсів. Виявилось, що номінали R3 та R4 майже не впливають на параметри вихідних імпульсів, суттєво впливають на діапазон вхідних фотострумів та майже не впливають на діапазон вихідних частот.

Для з'ясування величини впливу на діапазон вхідних фотострумів, експериментально були підібрані R3 та R4, при яких діапазон вхідних фотострумів виявився максимальним. Вони виявилися такі: $R3=1$ кОм, $R4=2,5$ кОм. Було проведено 2 експерименти для 2 фіксованих значень оптичної потужності на гальмівному вході $P_{глім}$ (фіксовані значення оптичної потужності $P_{глім}$ відповідають таким фотострумам: $I_{глім1}=0$, $I_{глім2}=1,8$ мА). В кожному з 2 експериментів оптична потужність на вході збудження змінювалася від 0 до 10,3 мВт (що відповідає зміні фотоструму через фотодіод оптопар VU1 від 0 до 5,5 мА). Графіки цих залежностей представлені на рис. 5.

Із рис. 4 та рис. 5 видно, що при зміні $R3=34$ кОм, $R4=9,1$ кОм на $R3=1$ кОм, $R4=2,5$ кОм, діапазон вихідних частот майже не змінився (був 0...7,7 кГц, став 0...9,8 кГц), а діапазон вхідних фотострумів (оптичних потужностей) розширився (був 0...350 мкА, став 0...6500 мкА).

Також було цікаво дослідити як схема працює на низькоомне навантаження (тобто коли навантаження еквівалентне рядку матриці світлодіодів). Тому було проведено експеримент при $R6=45,8$ Ом (без

VD2). при $I_{ГЛМ} = 0$. В експерименті оптична потужність на вході збудження змінювалася від 0 до 20,6 мВт (що відповідає зміні фотоструму через фотодіод оптопари VU1 від 0 до 11 мА). Результати експериментів у вигляді графіка наведено на рис. 6.

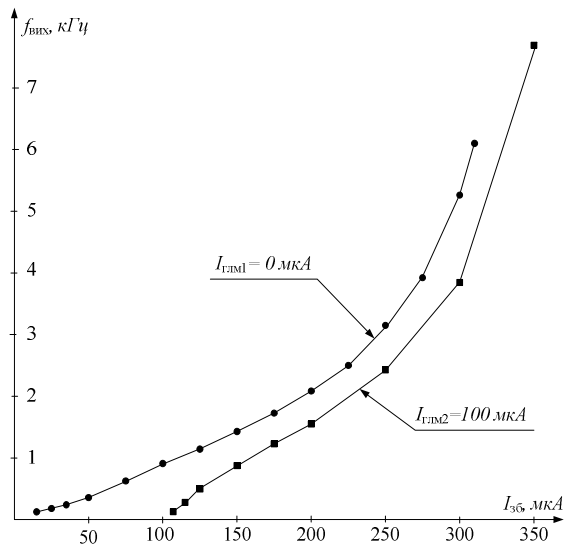


Рисунок 4 – Графіки залежностей вихідної частоти нейроелемента на тиристорі від фотоструму I_{36} збудження при $I_{ГЛМ1} = 0$ мкА, $I_{ГЛМ2} = 100$ мкА, $R3=34$ кОм, $R4=9,1$ кОм, $U_{cc}=12$ В

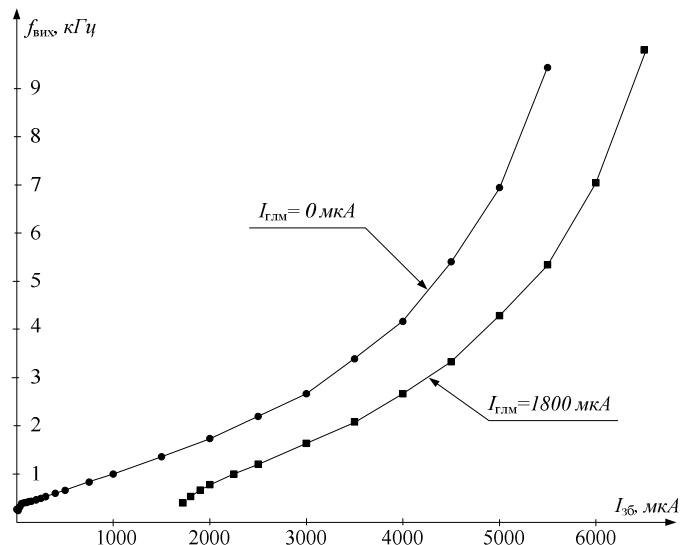


Рисунок 5 – Графіки залежностей вихідної частоти нейроелемента на тиристорі від фотоструму I_{36} збудження при $I_{ГЛМ1} = 0$ мкА, $I_{ГЛМ2} = 1800$ мкА, $R3=1$ кОм, $R4=2,5$ кОм, $U_{cc}=12$ В

Форма вихідних імпульсів нейроелемента на тиристорі представлена на рис. 7, причому на рис. 7а – форма імпульсу при невеликих значеннях вхідної оптичної потужності (фотоструму I_{36}), а на рис. 7б – при великих значеннях I_{36} . Тобто видно, що при збільшенні вхідної оптичної потужності (фотоструму I_{36}), максимальне значення амплітуди U_{Amax} зменшується, а мінімальне U_{Amin} – збільшується. Характер цієї залежності для параметрів схеми згідно рис. 6 представлено на рис. 8.

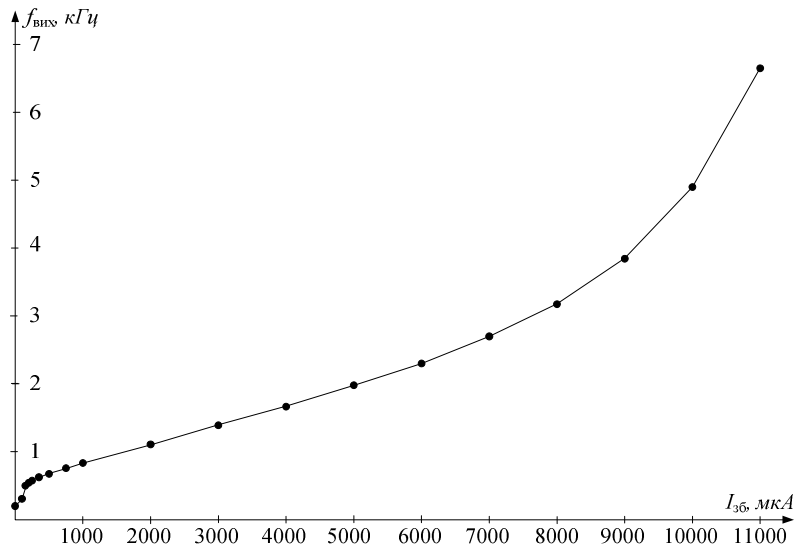


Рисунок 6 – Графік залежностей вихідної частоти нейроелемента на тиристорі від фотоструму I_{36} збудження при $I_{ГЛМ} = 0$ мкА, $R3=1$ кОм, $R4=2,5$ кОм, $R6=45,8$ Ом (без VD2).

Що стосується часових параметрів вихідних імпульсів, то з рис. 7 видно, що передній фронт імпульсу короткий (0,5 мкс), а задній фронт затягнутий, що викликано великим часом вимикання тиристорів. Взагалі, ширина вихідного імпульсу по рівню 0,5 – порядку 250 мкс, а по рівню 0,1 – 850...900 мкс. Така велика тривалість заднього фронту імпульсу є недоліком, тому треба застосовувати або спеціальні схеми для швидкого вимикання тиристорів або більш сучасні види тиристорів, наприклад, тиристори з польовим управлінням [7] (див. рис. 9).

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень було підтверджено працездатність запропонованого [4] нейроелемента на тиристорі і набуто числових значень його основних параметрів, які зведено до табл. 1.

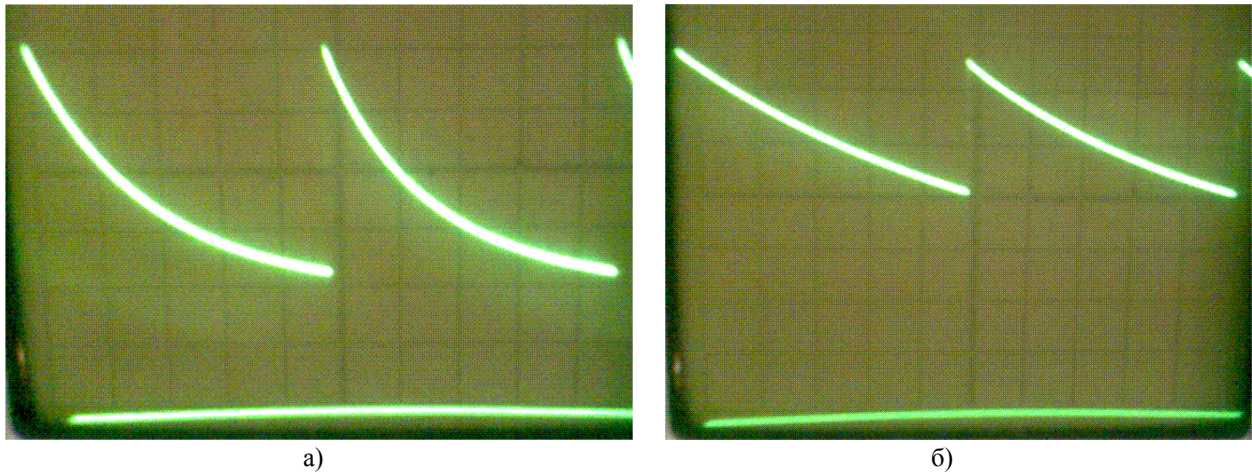


Рисунок 7 – Форма вихідних імпульсів нейроелемента на тиристорі при $I_{30}=150$ мкА, $R3=34$ кОм, $R4=9,1$ кОм, $U_{cc}=12$ В

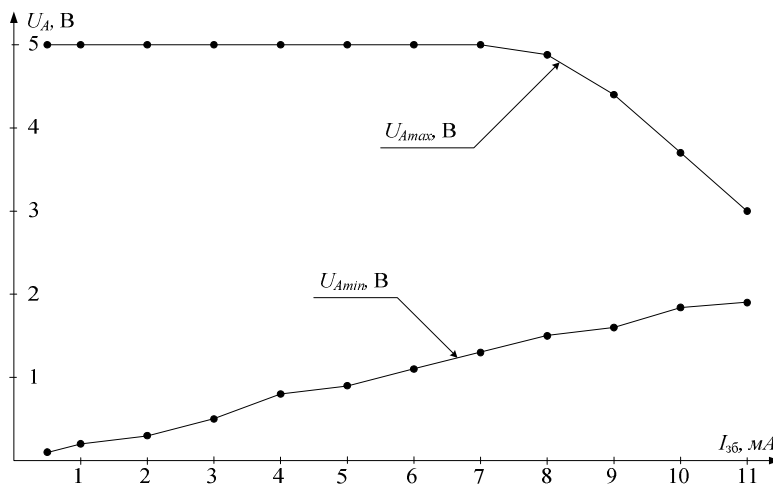


Рисунок 8 – Розмах амплітуди вихідних імпульсів нейроелемента на тиристорі при $R3=1$ кОм, $R4=45,8$ Ом, $U_{cc}=12$ В

Таблиця 1 – Числові значення основних параметрів нейроелемента на тиристорі

Назва параметра	Позначення	Значення параметра
Діапазон вхідних оптичних потужностей [мВт]	$P_{min} \dots P_{max}$	0...20
Діапазон вихідних частот [кГц]	$f_{min} \dots f_{max}$	0...10
Тривалість переднього фронту вихідного імпульсу [мкс]	t_{01}	0,5
Тривалість заднього фронту вихідного імпульсу [мкс]	t_{10}	800
Тривалість вихідного імпульсу по рівню 0,1 [мкс]	τ_{90}	850...900
Тривалість вихідного імпульсу по рівню 0,5 [мкс]	τ_{50}	250
Питома споживана потужність [мВт]	$P_{c \text{ птт}}$	360
Комутаційні втрати [мВт]	ΔP_K	155

Експериментальні дослідження виявили недоліки нейроелемента на тиристорі, які полягають в наступному:

- 1) вихідні імпульси мають затягнутий задній фронт, що відрізняє форму імпульсів нейроелемента на тиристорі від форми імпульсів біологічного нейрона,
- 2) погана лінійність передатної характеристики (див. рис. 4-6), особливо при великих значеннях сигналу збудження, причому похідна передатної характеристики зростає, хоча краще б вона зменшувалась (це більше відповідало б такій властивості нейрона як аккомодация),
- 3) при низькоомному навантаженні для ввімкнення тиристора потрібно, щоб $R4$ теж був низькоомним, а це значить, що буде великий паразитний струм розряду конденсатора $C1$ (див. рис. 2), що спричинить не зовсім вірну роботу нейроелемента при імпульсних вхідних сигналах,
- 4) схема має великі комутаційні втрати через наявність резистора $R5$ (див. рис. 2) та відносно великі струми закритого тиристора при струмах керуючого електрода, близьких до порогового,
- 5) хоча діапазон вихідних частот нейроелемента на тиристорі (0...10 кГц) краще, ніж у біологічних нейронів (0...2 кГц), все-одно через великий час вимикання тиристорів, слід реалізовувати імпульсні нейроелементи по структурно-функціональній моделі згідно рис. 1 на більш швидкодіючих напівпровідникових приладах з пороговими властивостями.

Щоб уникнути цих недоліків, потрібно в подальшому вдосконалити схему цього нейроелемента за рахунок використання нового типу тиристорів – тиристорів з польовим управлінням [7], які являють собою вдосконалення звичайного тиристора, що полягає у використанні для комутації струму пари МОН-транзисторів (рис. 9). Тиристири з польовим управлінням, порівняно зі звичайними тиристорами, мають більшу швидкодію (час затримки 300 нс), менш критичні до швидкості наростання струму, керуються набагато меншими струмами, мають більшу щільність струму, мале пряме падіння напруги у відкритому стані (~1,1 В), менші комутаційні втрати, можуть працювати паралельно.

Крім цього, інший шлях покращення параметрів імпульсних нейроелементів - будувати нейроелементи за схемою по рис.1 на основі інших (на відміну від тиристорів) порогових напівпровідникових пристроїв – біспін-приладів, лавинних транзисторів та ін.. Необхідну навантажувальну спроможність в цьому випадку можна досягти, під'єднавши до виходу біспін-приладу (лавинного транзистора або ін.) потужний біполярний чи польовий транзистор. А ще краще використовувати так звані біполярні транзистори з ізолюваним затвором - БТІЗ [8] (Insulated Gate Bipolar Transistor - IGBT). IGBT-прилад являє собою біполярний $p-n-p$ -транзистор, що керується від порівняно низьковольтного MOSFET-транзистору з індуктованим каналом (рис. 10 а). Умовне позначення IGBT-приладу показано на рис. 10 б.

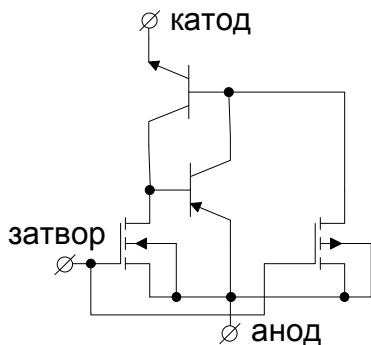


Рисунок 9 – Тиристор з польовим управлінням

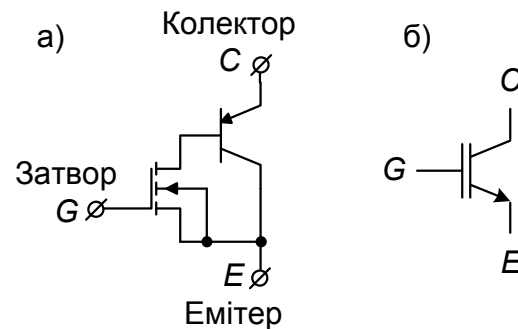


Рисунок 10 – Біполярний транзистор з ізолюваним затвором (IGBT):

- а) внутрішня структура IGBT-приладу,
- б) умовне позначення IGBT-приладу.

IGBT-прилади є компромісним технічним рішенням, яке дозволило об'єднати позитивні якості як біполярних (мале падіння напруги у відкритому стані, високі напруги комутації), так і MOSFET-транзисторів (мала потужність управління, високі швидкості комутації). В той же час втрати у них зростають пропорційно струму, а не квадрату струму, як у польових транзисторів. Максимальну напругу IGBT-транзисторів обмежено тільки технологічним пробоем і вже сьогодні випускаються прилади з робочою напругою до 4000 В. При цьому залишкова напруга на транзисторі у ввімкненому стані не перевищує 2...3 В.

Висновки

Таким чином, в статті запропоновано структурну схему реалізації імпульсної моделі нейрона. Згідно цієї схеми розроблено імпульсний нейронний елемент на тиристорі [4], який має велику навантажувальну спроможність, що дає змогу використовувати його для побудови компактних реалізацій імпульсних нейронних мереж [5] на основі матриць світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Однак експериментальні дослідження цього нейроелемента виявили низку його недоліків: велика тривалість заднього

фронту вихідного імпульсу; погана лінійність передатної характеристики; великі комутаційні втрати; великі паразитні струми витікання з накопичувального конденсатора. В подальшому потрібно вдосконалити схему цього нейроелемента за рахунок використання тиристорів з польовим управлінням [7], або будувати нейроелементи за схемою по рис.1 на основі інших порогових напівпровідникових пристроїв – біспін-приладів, лавинних транзисторів та ін. із застосуванням для підвищення навантажувальної спроможності біполярних транзисторів з ізолюваним затвором - БТІЗ [8] (IGBT-транзисторів).

Список літератури

1. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры. Кн.3: Учебное пособие для вузов/ Общая редакция А.И.Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. -528с.
2. Бардаченко В. Ф. Таймерні нейронні елементи та структури. Монографія / В. Ф. Бардаченко, О. К. Колесницький, С. А. Василецький. - Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 126 с.
3. Колесницький О. К. Пристрої для моделювання нейрона. Аналітичний огляд винаходів та патентів / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей, С. С. Яремчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №2. – С.23-31.
4. Пат. 55921 Україна, МПК G 06 G 7/00. Пристрій для моделювання нейрона / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей, С. М. Павлов, Г. О. Колесницька, заявник і власник патенту Вінницьк. нац. технічн. ун-т – № 201008531; заявлено 08.07.09; опубл. 27.12.10, Бюл.№24.
5. Колесницький О. К. Компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі / О. К. Колесницький, І. В. Бокоцей // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – №2. – С.54-62.
6. А.с. 376787 ССРС, МКІЗ G 06 F 7/60. Устройство для моделирования нейрона / Снежко Е.М. – № 1661157; заявлено 31.05.71; опубл. 05.04.73. Бюл.№17.
7. Нестеров С. А. Тиристоры с полевым управлением / С. А. Нестеров, Тетюшкин В. С. // Электронное научное издание "Электроника и информационные технологии", №1, 2010 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.fetmag.mrsu.ru/2010-1/pdf/Field-controlled_Thyristors.pdf.
8. Биполярный транзистор с изолированным затвором [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.texnic.ru/books/opis/sil_el/sil_el001.htm

Відомості про авторів

Колесницький Олег Костянтинович – докторант кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, тел. 59-88-32, okk_vin@mail.ru

Павлов Сергій Миколайович – доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури (ПКТА), Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

Бокоцей Ірина Віталіївна – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

Колесницька Ганна Олегівна – студент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури (ПКТА), Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.