УДК 004.67+519.65 DOI: 10.31673/2412-4338.2018.043239

Негоденко О. В. *Державний університет телекомунікацій, Київ*

МОДЕЛІ ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ НА ОСНОВІ СПЛАЙН-ФІЛЬТРІВ

Розглянуто підхід щодо покращення ефективності обробки інформаційних сигналів в безпроводових мережах на основі протоколу LoRaWAN. Запропоновано метод відновлення інформаційного сигналу у системі зв'язку інтерполяцією двійкового сигналу з використанням фундаментального тригонометричного сплайна. Показано, що використання фундаментальних тригонометричних сплайнів дозволить з меншою похибкою відтворювати інформаційні сигнали на виході демодулятора.

Ключові слова: *Інтернет речей, інформаційний сигнал, фундаментальний тригонометричний сплайн, LoRaWAN, ймовірність помилки, сплайн-фільтр.*

Nehodenko O. V. *State University of Telecommunications, Kyiv*

MODELS OF RESTORATION OF SIGNALS IN TECHNOLOGIES OF INTERNET THINGS ON THE BASIS OF SPLINE FILTERS

An approach to enhance the effectiveness of processing information signals in wireless networks on the basis of LoRaWAN protocol is introduced. This protocol is used to connect devices in a single control system of the Internet of things concept. Also, this protocol allows for covering a large range of activities with lower power consumption. With that, the main task was identified - to increase the number of channels in one frequency band. Models of information signals are proposed on the basis of fundamental trigonometric splines. It is shown that these models take into account the differential properties of information signals during the modulation stage. The main advantage is that the calculation of values of fundamental trigonometric splines can be done in real time. A method of information signal restoration in the communication system with the help of binary signal interpolation using fundamental trigonometric splines is proposed. With the use of this approach, effective detection of signal on the noise background is conducted by a spline filter based on the trigonometric spline. The stability of communication system is defined with the help of the signal error probability parameter in the signal-to-noise ratio. It is demonstrated that the use of fundamental trigonometric splines in the communication system allows for reproducing information signals with a lower margin of error in demodulation output. On the basis of these models, it is recommended to create methods that will allow for the increase in the number of connected devices in the single control system, thus increasing the number of channels in one frequency domain.

Key words*: Internet of things, information signals, fundamental trigonometric splines, communication networks, LoRaWAN, error probability, spline filters.*

Негоденко Е. В. *Государственный университет телекоммуникаций, Киев*

МОДЕЛИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ СПЛАЙН-ФИЛЬТРОВ

Рассмотрен подход по улучшению эффективности обработки информационных сигналов в беспроводных сетях на основе протокола LoRaWAN. Предложен метод восстановления информационного сигнала в системе связи интерполяцией двоичного сигнала с использованием фундаментального тригонометрического сплайна. Показано, что использование фундаментальных тригонометрических сплайнов позволит с меньшей погрешностью воспроизводить информационные сигналы на выходе демодулятора.

Ключевые слова: *Интернет вещей, информационный сигнал, фундаментальный тригонометрический сплайн, LoRaWAN, вероятность ошибки, сплайн-фильтр.*

© Негоденко О. В., 2018

1. Вступна частина

Особливе місце в сучасних інформаційних технологіях набуває концепція Інтернет речей (Internet of things – IoT), основна ідея якої – можливість підключити кожен об'єкт (речі) до мережі, обробити інформацію, що надходить з оточення та обмінюватися даною інформацією. Концепція і термін для неї вперше сформульовані в Америці в 1999 році. А в 2008 році концепція набула всесвітнього значення, коли кількість пристроїв, підключених до глобальної мережі, перевищила чисельність населення Землі [1, 2].

Необхідність передавання, обробки і приймання сигналів лежить в основі концепції IoT. Всі ці дії в першу чергу впливають на надійне отримання інформації з складних і несприятливих середовищ з використанням масиву підключених датчиків і розподіленої обробки сигналів; передачу та обробку даних з пристроїв з низьким споживанням власної потужності; збереження конфіденційності інформації, що використовується спільно з підключеними пристроями; а також відновлюватись у випадку аварійної ситуації.

У системах IoT передача даних та їх обмін є важливим для продуктивності всієї системи. Таким чином, дослідження, розробка та збір інформації в цій сфері викликають все більший інтерес, з'являються нові стандарти та протоколи для взаємодії між пристроями, а також наявні модулі для вимірювання та зв'язку.

Для забезпечення зв’язку між великою кількістю пристроїв використовують технології проводових і безпроводових мереж. Серед існуючих безпроводових технологій, привертає увагу технологія LPWAN, що забезпечує енергоефективну передачу даних на великі відстані. Одним із протоколів даної технології, є протокол LoRaWAN для мереж з великою кількістю вузлів, з великим радіусом дій і низьким енергоспоживанням.

Протоколу LoRaWAN спирається на модуляцію з розширенням спектра LoRa, що працює за принципом:

Дана технологія передає інформацію по каналам CDMA, що являють собою множинний доступ з кодовим мультиплексуванням каналів, які дозволяють ефективно використовувати частотний діапазон. Постає питання про збільшення числа каналів в одній частотній смузі, що забезпечить підключення більшої кількості пристроїв в одну систему управління.

Дане завдання є *актуальним*, оскільки число пристроїв, що підключають в єдину IoT систему з кожним роком збільшується. Розширення частотної смуги нераціонально через високу вартість додаткових смуг частот і жорстких вимог до електромагнітної сумісності.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження

З розвитком концепції IoT велику увагу науковці приділяють питанням безпеки підключення пристроїв, безпеки передачі, сумісного функціонування різних пристроїв в одній системі управління. Також привертають увагу напрямки розвитку безпроводових систем зв'язку, що забезпечують значне збільшення швидкості передачі даних і зростання кількості користувачів.

В роботі [4] запропоновано вирішення проблеми розширення частотної смуги шляхом застосування просторової обробки сигналу, а саме використанні адаптивної і просторово-часової обробки сигналів, а також реалізації комбінованих (адаптивних) методів множинного доступу (МД), в основу яких покладено МД з просторовим розділенням каналів (SDMA – Space Division Multiple Access) [5].

Вирішення задачі моделювання процесів обробки та відновлення сигналів, показано в [6]. В цій праці розкрито питання передавання і приймання цифрових сигналів з

використанням сплайн базисів, а також проведено стійкість системи управління до відношення сигнал/шум. Сплайн-функції широко використовуються для моделювання цифрових сигналів, що показано в роботах [7 – 9].

В працях [10, 11] надані загальні відомості тригонометричних сплайнів, а також їх переваги над поліноміальними сплайнами, без урахування особливостей застосування їх до задач обробки та відновлення сигналів в системах зв'язку.

3. Мета і задачі дослідження

З аналізу публікацій маємо, що розвиток глобального інформаційного суспільства супроводжується бурхливим зростанням кількості інформаційних пристроїв. Основною вимогою є забезпечення обслуговування інформаційною мережею максимальної кількості різнотипного обладнання. Головним недоліком є обмеження в частотному діапазоні. Оскільки під кожну технологію виділяється своя частота, яка вміщує певну кількість смуг. Постає *задача* – збільшення кількості каналів в одній частотній смузі. Для вирішення даного завдання пропонується математична модель інформаційних сигналів на основі тригонометричних сплайнів, як моделів, що дозволяють враховувати диференціальні властивості сигналів в задачах обробки сигналів в каналах зв'язку.

Мета представленого в статті дослідження полягає у підвищенні ефективності роботи інформаційної мережі для датчиків IoT шляхом реалізації моделей обробки інформації на основі сплайн-фільтрів.

4. Моделі для обробки інформаційних сигналів

4.1 Фундаментальні апроксимаційні функції

Для забезпечення максимальної пропускної здатності, потрібно збільшити кількість каналів, при цьому звузити смугу пропускання. Але це призводить до збільшення тривалості сигналу і до явища інтерференції ISI, що негативно впливає на прийом сигналів.

Для вирішення цієї проблеми в [4] показано використання в каналах зв'язку сигналів і фільтрів типу Найквіста, що мають нульову міжсимвольну інтерференцію у моменти взяття відліків значень вибірки. При цьому імпульс Найквіста зображають за допомогою базисної функції локального кубічного ермітового сплайну.

В даній роботі пропонуємо в ролі базисних функцій використовувати фундаментальні функції деяких класів. Однією з суттєвих переваг такого підходу є те, що в ролі коефіцієнтів узагальненого многочлена (або ряду) по цих функціях виступають миттєві значення досліджуваних сигналів; в свою чергу, це дозволяє значно спростити алгоритми обробки таких моделей.

Клас фундаментальних функцій, заданих на всій чисельній вісі, утворюють і функції Котельнікова-Шеннона, які у теорії інформації відіграють важливу роль.

Згідно теореми Шеннона, фінітну функцію з обмеженим спектром можна відновити абсолютно точно, використовуючи лише значення цієї функції на зліченній множині рівновіддалених значень аргументу. При цьому відновлювана функція подається рядом Шеннона

$$f(x)=\sum_{j=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{j}{2F_m}\right)\times\frac{\sin 2\pi F_m\left(x-\frac{j}{2F_m}\right)}{2\pi F_m\left(x-\frac{j}{2F_m}\right)},$$

де F_m –верхня гранична частота сигналу.

Але дана теорема носить суто теоретичний характер, оскільки відновлення реальних сигналів скінченими сумами ряду Шенонна відбувається з деякою похибкою і у багатьох випадках не є оптимальним.

Проте ідея подання сигналів узагальненим многочленом по деякій системі функцій $\varphi_k(x)$, де $k \in Z$, коефіцієнтами якого є значення сигналів у деякі моменти часу, тобто у вигляді

$$f(x) = \sum_{k=0}^{N} f(k\Delta x)\varphi_k(x)$$

де $f(k\Delta x)$ – значення сигналу у деякий момент часу, $\varphi_k(x)$ – деяка система функцій.

Важливим є вибір систем функцій $\varphi_k(x)$, а також умови, яким повинні задовольняти функції таких систем.

Системи функцій, які можуть застосовуватися для такого подання, на сітках $\Delta = \{x_i\}$ повинні задовольняти співвідношенню

$$\varphi_k(x_i) = \begin{cases} 1, & k = i; \\ 0, & k \neq i. \end{cases}$$

Такі системи функцій будемо називати фундаментальними системами функцій, область визначення яких має бути меншою ніж проміжок існування сигналу.

До фундаментальних систем функцій належать система функцій Шеннона, система інтерполяційних многочленів Лагранжа, система фундаментальних інтерполяційних поліноміальних сплайнів та система фундаментальних інтерполяційних тригонометричних многочленів.

В роботі [10] досить детально розглянуті питання побудови даних фундаментальних функцій. При цьому привертає увагу клас інтерполяційних тригонометричних сплайнів, що є більш ширшим і включає клас поліноміальних сплайнів. Широке розповсюдження саме цих систем функцій пояснюється тим, що алгебраїчні і тригонометричні многочлени є лінійно щільними множинами у просторах відповідно неперервних і періодичних неперервних функцій; поліноміальні ж і тригонометричні сплайни є вельми зручними узагальненими цих многочленів.

4.2. Фундаментальні тригонометричні сплайни

Розглянемо функцію $f(x)$ на відрізку $[0,1]$. Припустимо, що на цьому відрізку задано сітку

$$\Delta_N,\ \Delta_N = \{x_i\}_{i=0}^{N},\quad 0 = x_0 < \cdots < x_N = 1$$

і еквідистантні сітки

$$\tilde{\Delta}_N,\ \tilde{\Delta}_N = \{x\}_{i=0}^{N},\quad x_i = \frac{i}{N}.$$

Поліноміальні інтерполяційні сплайни широко застосовують в задачах моделювання сигналів. Це пояснюється їх апроксимативними властивостями [10].

До їх переваг слід також віднести те, що при побудові сплайнів використовуються многочлени невисоких степенів (найчастіше третього степеня). Це пояснюється тим, що система лінійних рівнянь, з якої визначаються параметри сплайну, ускладнюється з ростом степеня сплайну. Відзначимо, що поліноміальні сплайни вперше надали можливості отримувати моделі сигналів з певними диференціальними властивостями, які, як відомо, відіграють неабияку роль в задачах моделювання і обробки сигналів.

Головним недоліком поліноміальних сплайнів слід вважати те, що ці сплайни складаються з складових функцій; це значно обмежує їх застосування в багатьох задачах обробки сигналів.

Для відновлення сигналів, як складовою фільтрів, доцільніше застосовувати тригонометричні сплайни, значення яких у вузлах сітки співпадають із значеннями тригонометричного многочлена порядку m найкращого середньоквадратичного наближення, побудованого по значеннях функції на дискретній множині рівновіддалених точок.

Тригонометричний сплайн порядку m можна побудувати за формулою

$$T s_n^*(x) = \sum_{j=1}^{N} f_j \left\{ \frac{1}{N} + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{m} g_j^{-1}(r,N) \left[C_j(r,x) \cos jx_k + S_j(r,x) \sin jx_k \right] \right\},$$

де

$$C_j(r,x) = \frac{\cos jx}{j^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\cos\cos(mN+j)x}{\left[(mN+j)\right]^{r+1}} + \frac{\cos\cos(mN-j)x}{\left[(mN-j)\right]^{r+1}} \right];$$

$$S_j(r,x) = \frac{\sin jx}{j^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\sin\sin(mN+j)x}{\left[(mN+j)\right]^{r+1}} + \frac{\sin\sin(mN-j)x}{\left[(mN-j)\right]^{r+1}} \right];$$

$$g_j(r,x) = \frac{1}{j^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\left[(mN+j)\right]^{r+1}} + \frac{1}{\left[(mN-j)\right]^{r+1}} \right];$$

що можна подати у вигляді

$$TS_{n,r}^*(x) = \sum_{j=1}^{N} f_j ts_{j,m}^*(r,x),$$

де

$$\varphi_{j,m}(r,x) = ts_{j,m}^*(r,x) \frac{1}{N} + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{m} g_j^{-1}(r,N) \left[C_j(r,x) \cos jx_k + S_j(r,x) \sin jx_k \right].$$

Тригонометричні сплайни $\varphi_{j,m}(r,x)$ називають апроксимаційними фундаментальними тригонометричними сплайнами [11]. Графіки деяких $\varphi_{j,m}(r,x)$ при фіксованих j і n для різних значень параметрів m і n наведено на рис. 1.

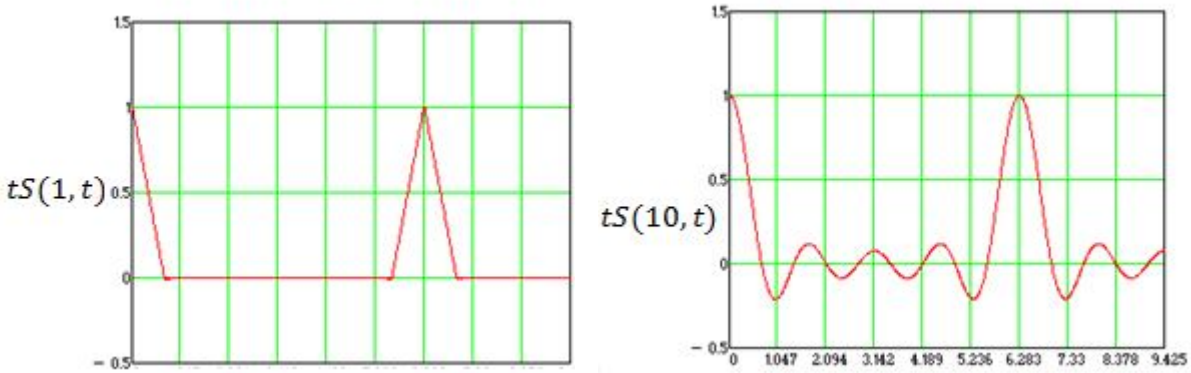

Рис.1 Графік тригонометричного сплайна при $r=1$ та $r=10$.

Як видно з рис. 1 тригонометричний сплайн дискретного середньоквадратичного наближення при значенні параметра r, складається із ламаних, які зшиваються у вузлах сітки.

Також тригонометричні сплайни мають неперервну похідну $r-1$ порядку при всіх $j, j=1,2,\ldots,m,$ що є важливим при використанні їх в цифрових системах передавання сигналу.

Як випливає з наведених формул, для побудови фундаментальних тригонометричних сплайнів немає потреби розв'язувати будь-які системи рівнянь.

4.3. Сплайн-фільтр для цифрових систем зв'язку

Застосуємо фундаментальні тригонометричні сплайни для побудови моделі, що описує передавання двійкового цифрового сигналу через канал CDMA із завадою у вигляді шуму, схему якого показано на рис. 2.

Як відомо, імпульсний цифровий сигнал має широкий спектр, а тому займає велику смугу частот. Мінімізувати ширину спектру можна за рахунок пропускання через канал зв'язку. За допомого інтерполяційного тригонометричного сплайна можна будувати неперервний сигнал, який описує імпульсний двійковий сигнал, але має задану і меншу ширину спектра.

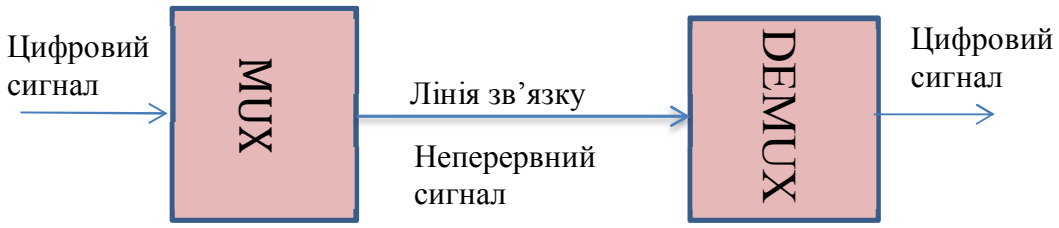

Рис. 2 Схема каналу зв'язку

Як відомо, імпульсний цифровий сигнал має широкий спектр, а тому займає велику смугу частот. За допомого інтерполяційного тригонометричного сплайна можна будувати неперервний сигнал, який описує імпульсний двійковий сигнал, але має задану і меншу ширину спектра.

Внаслідок дії шуму сигнал змінюється під час проходження крізь канал і надходить на вхід демодулятора (рис. 2). В лінії як джерело шуму можна використовувати генератор гаусівського шуму.

Демодулятор виступає фільтром для виділення корисної складової вхідного сигналу (як варіант в [6] фільтр Савіцькього-Голея), на основі тригонометричного сплайна і за допомогою порогового пристрою визначає, яке з можливих значень сигналу передавалось.

Завадостійкість демодулятора дискретних сигналів визначають ймовірністю помилки сигналу $P_{пом.}$, що залежить від методу модуляції, способу прийому, відношення середньої енергії сигналів до потужності шуму.

Для заданої системи модуляції будуємо графік (рис. 3) залежності $P_{пом.} = f(E_б / N_0)$, де $E_б / N_0$ – відношення середньої енергії сигналів до потужності шуму. При побудові потрібно враховувати, що графік для $P_{пом.}$ логарифмічний, а для $E_б / N_0$ виражений у децибелах ($E_б / N_0[дБ] = 10\lg E_б / N$) – лінійний.

5. Результати дослідження

Для забезпечення обслуговування інформаційною мережею максимальної кількості різнотипного обладнання, що входять в одну систему управління для підключення пристроїв IoT, запропоновано в каналі зв'язку використовувати моделі інформаційних сигналів на основі фундаментальних тригонометричних сплайнів. Дані моделі враховують диференціальні властивості інформаційних сигналів, що сприяє ефективному використанню їх в лінії зв'язку як на етапі модуляції, так і на етапі демодуляції. Дану ефективність показує

імовірність похибки, що збільшується досить повільно і досягає значення $P_{пом.} \approx 0,48$ (що вказує на стійкість системи зв'язку, в якій використовують фундаментальні тригонометричні сплайни).

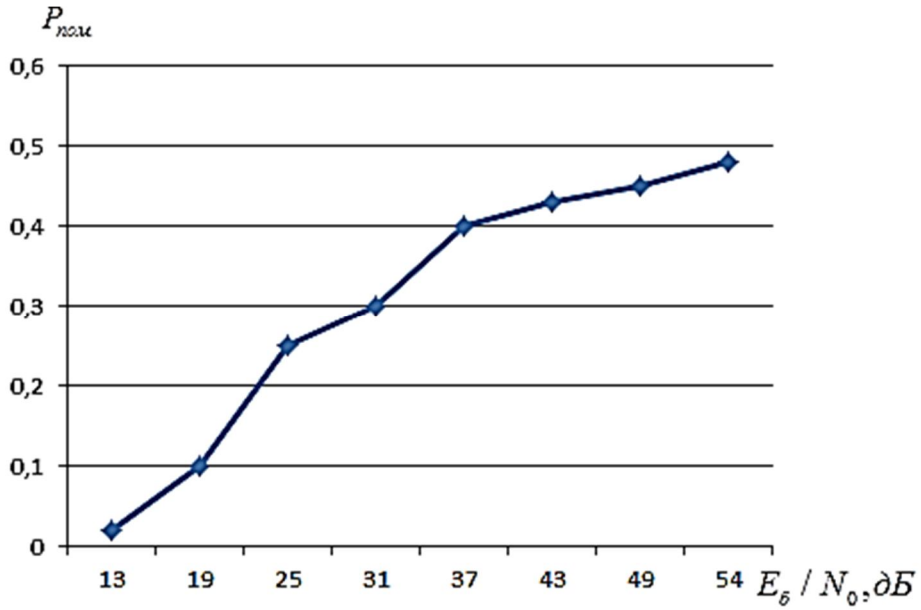

Рис. 3. Залежність оцінки ймовірності похибки від співвідношення сигнал/шум

6. Висновки

Інформаційний сигнал у цифровій системі може бути відновлений інтерполяцією двійкового сигналу з використанням фундаментального тригонометричного сплайна. Для побудови даних функцій немає потреби розв'язувати будь-які системи рівнянь, а алгоритми побудови тригонометричних сплайнів не залежать від степеня цих сплайнів, у порівнянні з поліноміальними сплайнами.

До недоліків тригонометричних сплайнів слід віднести те, що їх побудова вимагає більших витрат машинного часу, але при цьому обчислення значень фундаментальних тригонометричних функцій можна вести у масштабі реального часу.

Використовуючи фундаментальні тригонометричні сплайни для обробки інформації в системах зв'язку на основі модуляції LoRa, що не вимагає швидкої передачі даних на великі відстані, можливо підвищити ефективність роботи інформаційної мережі для датчиків IoT.

7. Список використаної літератури

1. Ashton K. That Internet of Things / K. Ashton // Thing. RFID Journal, 22 July 2009. [Electronic resource]. – Mode of access http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986.

2. Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015. [Electronic resource].–Mode of access http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317.

3. Whitmore Andrew. The Internet of Things – A survey of topics and trends / Whitmore Andrew, Anurag Agarwal, and Li Da Xu // Information Systems Frontiers. – 2015. – Vol. 17. – №2. –P. 261-274.

4. Обод І. І., Стрельницький О. О., Буланий О. А. Просторовий метод підвищення пропускної здатності телекомунікаційних мереж // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць ХУ ПС ім. Івана Кожедуба. – 2016. – Вип. 9 (125). – С. 140-142.

5. Обод И.И., Кинан Арус. Сравнительный анализ методов множественного доступа в мобильных информационных сетях // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць ХУ ПС ім. Івана Кожедуба. – 2013. – Вип. 1(108). – С. 207-211.

6. Бойко І. Ф., Гордєєв М. Г. Кутін А. І. Передавання і приймання цифрових сигналів у сплайнових базисах // Електроніка та системи управління: зб. наук. праць. – Київ: НАУ, 2012. №3 (33) – С. 5–12.

7. Шелевицький І. В.Сплайни в цифровій обробці даних і сигналів / Шутко М. О., Шутко В. М., Колганова О. О. – Київ: НАУ, 2008. – 232 с

8. Денисюк В. П. Сплайни та сигнали. / В. П. Денисюк. – Київ, ЗАТ «ВІПОЛ», 2007 р. – 228с.

9. Кутін А. І. Багатоканальна система передачі даних у сплайнових базисах / А. І. Кутін // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2014. – № 796. – С. 75-82.

10. Денисюк В. П. Фундаментальні функції та тригонометричні сплайни / В. П. Денисюк. – Київ: ПАТ «Віпол», 2015. – 296 с.

11. Денисюк В. П. Тригонометричні ряди та сплайни / В. П. Денисюк. – Київ: НАУ, 2017. – 212 с.

8. References

1. Ashton K. That Internet of Things / K. Ashton // Thing. RFID Journal, 22 July 2009. [Electronic resource]. – Mode of access http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986.

2. Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015. [Electronic resource].–Mode of access http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317.

3. Whitmore Andrew. The Internet of Things – A survey of topics and trends / Whitmore Andrew, Anurag Agarwal, and Li Da Xu // Information Systems Frontiers. – 2015. – Vol. 17 №2. – P. 261-274.

4. Obod I.I., Strelnytskyi O.O., Bulanyi O.A. Spatial Method for Increasing the Bandwidth of Telecommunication Networks. Information processing systems. 9(125)(2016): 140-142.

5. Obod I.I., Kinan Arus. Comparative Analysis of Multiple Access Methods in Mobile Information Networks. Information processing systems. 1(108)(2013): 207-211.

6. Boiko I.F., Gordeiev M.G. Kutin A.I. Transmission and reception of digital signals in spline bases. Electronics and control systems.3 (33)(2012): 5-12.

7. Shelevitsky I. Splanes in the digital processing of data and signals / Shutko M. O., Shutko V. M, Kolganova O.O. - Kyiv: NAU, 2008. - 232 p.

8. V. Denysiuk (2007) Splines and signals. Vipol. NAU. Print.

9. Kutin A.I. “Multichannel data transfer system in spline bases”.Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Series of Radioelectronics and Telecommunications 796 (2014): 75-82. Print.

10. V. Denisyuk (2015) Fundamental Functions and Trigonometric Splines. Vipol. NAU. Print.

11. V. Denysiuk (2017) Trigonometric series and splines. NAU. Print.

Автор статті (Author of the article)

Негоденко Олена Василівна – старший викладач кафедри Інженерії програмного забезпечення (Nehodenko Olena Vasylivna – senior teacher of Software Engineering Department). Phone: +380 98 071 3787. E-mail: negodenkoav@i.ua.