

АНОТАЦІЯ

Сулема О. К. Алгоритмічне та програмне забезпечення процесів автоматичної ідентифікації об'єктів логістики на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Автоматична ідентифікація об'єктів є важливим аспектом у багатьох галузях людської діяльності, однією з яких є логістика. Застосування технологій автоматичної ідентифікації об'єктів логістики дозволяє спростити відстежування їхнього місцезнаходження під час транспортування та складського зберігання, а також забезпечити процеси контролю, звітування тощо. Це позитивно впливає на інтенсифікацію виробництва, торгівлі, зокрема міжнародної, поштових сервісів тощо завдяки безпомилковому та швидкому доступу до інформації про об'єкти обліку, а також автоматичному збору даних про них та оновлення цих даних у програмних системах без втручання людини.

Автоматична ідентифікація об'єктів може ґрунтуватись на технологіях подання даних на основі штрихових кодів, радіочастотної ідентифікації, смарт-карт тощо. Однією з найпоширеніших технологій автоматичної ідентифікації об'єктів є технологія на основі штрихового кодування інформації, яка забезпечує високу точність та швидкість введення інформації до комп'ютерних систем та є економічно привабливою завдяки низькій вартості витратних матеріалів і доступному обладнанню.

На сьогодні існує низка підходів до подання даних у вигляді штрихових кодів, проте досі залишаються актуальними задачі підвищення

щільності подання інформації у вигляді штрихових кодів та підвищення завадостійкості штрихкодів позначок.

Іншою важливою проблемою, пов'язаною зі створенням програмних систем на основі технології штрихового кодування для галузі логістики, є відсутність проблемно-орієнтованого підходу до задачі інтегрування елементів технології штрихового кодування при розробленні програмного забезпечення процесів автоматичної ідентифікації об'єктів.

Наявність зазначених актуальних задач та проблем визначає актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення процесів автоматичної ідентифікації об'єктів на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, яка вирішується у цій дисертаційній роботі.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності логістичних систем за рахунок автоматизації виробничих процесів на основі високощільного штрихового кодування даних про об'єкти логістики.

У першому розділі дисертаційної роботи проаналізовано алгоритмічно-програмні рішення для автоматичної ідентифікації об'єктів у галузі логістики, зокрема вивчено сучасний стан логістичного програмного забезпечення, досліджено методи автоматичної ідентифікації об'єктів та особливості оброблення штрихкованої інформації, що дозволило сформулювати основні вимоги до програмного забезпечення процесів автоматичної ідентифікації об'єктів логістики.

У другому розділі розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення процесів формування даних на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, зокрема сформульовано задачу забезпечення компактного подання даних у вигляді штрихкодів зображень, розроблено й досліджено алгоритмічне та програмне забезпечення процесів ущільнення даних при формуванні штрихкодів позначок, розроблено й

досліджено алгоритмічне та програмне забезпечення процесів формування дворівневих штрихкодів позначок.

У третьому розділі розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення завадостійкості штрихових кодів з трьома градаціями кольору, зокрема сформульовано задачу забезпечення завадостійкості штрихкодів зображень, розроблено й досліджено алгоритмічне та програмне забезпечення завадостійкості штрихових кодів з трьома градаціями кольору.

Четвертий розділ присвячено створенню елементів технології проектування програмного забезпечення процесів автоматичної ідентифікації об'єктів логістики на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, зокрема запропоновано шкалу пріоритизації вимог до розроблюваної програмної системи, сформульовано вимоги до програмної системи для автоматичної ідентифікації об'єктів логістики на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, запропоновано базову архітектуру програмної системи автоматичної ідентифікації об'єктів на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, розроблено шаблон проектування «Перетворювач», визначено основні етапи технології проектування програмних засобів для автоматичної ідентифікації об'єктів логістики на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору.

У дисертаційній роботі отримано низку **нових наукових результатів**, зокрема **уперше** запропоновано базову архітектуру програмної системи автоматичної ідентифікації об'єктів логістики на основі штрихових кодів з трьома градаціями кольору, використання якої дозволяє спростити процес розроблення програмного забезпечення систем автоматичної ідентифікації об'єктів та яка, на відміну від існуючих, створює можливість дворівневого доступу до інформації про об'єкт логістики та підвищення щільності подання даних завдяки використанню дворівневих штрихових кодів з трьома градаціями кольору.

Уперше розроблено структурний метод ущільнення алфавітно-цифрових даних, що підлягають поданню у вигляді штрихового коду з трьома градаціями кольору, який передбачає використання, крім комп'ютерного алфавіту ASCII, кількох додаткових алфавітів з потужностями, меншими за 256 (потужність ASCII), та ґрунтується на розбитті вхідної алфавітно-цифрової послідовності на суміжні підпослідовності символів та їх перетворенні у триколірні (трійкові) штрихкодіві знаки, сумарна довжина яких менша, аніж трійкова довжина вхідних повідомлень, що підвищує інформаційну щільність подання даних на носії у середньому в 1,16–1,5 разів та переважає аналогічний показник у разі застосування для ущільнення статистичних методів (на основі кодів Хаффмана, Шеннона-Фано).

Уперше розроблено математичну модель, яка дозволяє здійснювати вибір оптимальної кількості додаткових (окрім ASCII) алфавітів для використання при перетворенні вхідних алфавітно-цифрових даних, що підлягають поданню у вигляді штрихових кодів з трьома градаціями кольору, та визначати оптимальні потужності цих алфавітів і тип перетворення підпослідовностей суміжних символів у числову форму, за яких досягається максимально можливе інформаційне ущільнення даних на штрихковому носії.

Уперше розроблено алгоритмічне забезпечення процесу завадозахищеного кодування штрихкодівих позначок з трьома градаціями кольору, визначальною рисою якого є застосування обчислень у скінченному полі $GF(3^s)$ за модулем незвідного многочлена степеня s , що забезпечує виправлення спотворень двох видів – помилок і стирань, та уможлиблює відновлення даних при ушкодженні до 37,5% площі штрихкодівого зображення.

Уперше розроблено метод дворівневого штрихового кодування двох незалежних наборів даних та алгоритмічне забезпечення процесів формування штрихкодів з трьома градаціями кольору, характерною рисою яких є застосування процедур визначення контрольного біта для подання другого набору даних та створення дворівневої штрихкової позначки, що забезпечує розмежування доступу до інформації про об'єкт логістики.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 7 наукових працях, зокрема у 5 наукових статтях, з яких 1 статтю опубліковано у закордонному фаховому виданні третього квартала (Q3), яке проіндексоване в базі даних Scopus, 1 статтю опубліковано у періодичному науковому виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, 1 статтю опубліковано у виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А», і 2 статті опубліковано у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б», та у 2 матеріалах науково-технічних конференцій, з яких 1 публікація у матеріалах міжнародної наукової конференції, що проіндексовано у базі даних Scopus.

Ключові слова: прикладне програмне забезпечення, архітектура програмного забезпечення, шаблон проєктування, логістична програмна система, автоматична ідентифікація об'єктів, штрихове кодування.

SUMMARY

Sulema O. Algorithms and software for logistics object automatic identification processes based on barcodes with three gradations of colour. – Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 12 Information technologies in a specialty 121 Software engineering. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

Automatic object identification is an important aspect in many areas of human activity, one of which is logistics. The use of technologies for automatic identification of logistics objects makes it easier to track their location during transportation and warehousing, as well as to ensure the processes of control, reporting, etc. This has a positive effect on the intensification of production, trade, including international, postal services, etc. due to error-free and fast access to information about accounting objects, as well as automatic collection of data about them and updating this data in software systems without manual intervention.

Automatic object identification can be based on barcode data technologies, radio frequency identification, smart cards, etc. One of the most common technologies for automatic object identification is barcoding technology, which provides high accuracy and speed of information entry into computer systems and is economically attractive due to low cost of consumables and affordable equipment.

Nowadays, there is a number of approaches to the presentation of data in the form of barcodes, but increasing both the density of information in the form of barcodes and the noise immunity of barcodes still remains a topical task. Another important problem related to the creation of software systems based on barcoding technology for the logistics industry is the lack of a problem-oriented approach to integrating elements of barcoding technology in the development of

software for automatic object identification processes. The presence of these problems determines the topical scientific and technical problem of improving the development efficiency of algorithmic methods and software for automatic identification of objects based on barcodes with three colour gradations, which is solved in this dissertation.

The purpose of the dissertation is to increase the efficiency of logistic systems by automating production processes using high-dense data barcoding of logistics objects.

The first section of the dissertation analyses algorithmic and software solutions for automatic identification of objects in the field of logistics, in particular, the current state of logistics software, methods of automatic identification of objects and features of barcode information processing, which allowed to form basic requirements for software of automatic identification of logistics objects.

In the second section the algorithmic methods and software for processes of data formation on the basis of barcodes with three gradations of colour are developed, in particular, the problem of providing compact representation of data in the form of barcode images is formulated, the algorithmic methods and software for data consolidation for formation of barcodes and the algorithmic methods and software for formation of two-layer barcode symbols are developed and investigated.

In the third section the algorithmic methods and software of noise immunity of barcodes with three colour gradations are developed, in particular, the problem of ensuring noise immunity of barcode images is formulated, the algorithmic methods and software of noise immunity of barcodes with three gradations of colour are developed and investigated.

The fourth section is devoted to the creation of the design technology elements for logistics objects automatic identification software based on barcodes with three gradations of colour, in particular, a scale of requirement prioritization

for software systems development is proposed, the requirements for a software system for logistics objects automatic identification based on barcodes with three colour gradations are formulated, the basic architecture of a software system for objects automatic identification based on barcodes with three gradations of colour as well as a design pattern «Converter» are proposed, and the main stages of software design software for logistics objects automatic identification based on barcodes codes with three gradations of colour are formulated.

The dissertation provides a number of **new scientific results**, in particular, the basic architecture of a software system for automatic identification of logistics objects based on barcodes with three gradations of colour is proposed **for the first time**; the use of this architecture simplifies the process of software development for automatic object identification systems; unlike the existing ones, this architecture allows to provide two levels of access to information about the logistics object and to increase the density of data representation through the use of two-layer barcodes with three gradations of colour.

For the first time, the structural method of compression of alphanumeric data to be presented in the form of a barcode with three gradations of colour is developed; the method provides the use of several additional alphabets with capacities less than 256 (ASCII power), in addition to the computer alphabet ASCII; the method is based on splitting the input alphanumeric sequence into adjacent subsequences of characters and converting them into tricolour (triple) barcodes, the total length of which is less than the triple length of incoming messages, which increases the information density of data on a carrier in 1.16-1.5 times on average and prevails similar characteristics in the case of using statistical methods (based on Huffman, Shannon-Fano codes) for data compression.

For the first time, a mathematical model, which allows selecting an optimal number of additional (except ASCII) alphabets for converting input alphanumeric data to be presented in the form of barcodes with three gradations of colour, is developed; this enables determination of both an optimal power of these alphabets and a type of character subsequence conversion into a numerical form that allow to achieve the maximum possible information compression of data to be located on a barcode carrier.

For the first time, the algorithmic methods for noiseless barcoding with three gradations of colour is proposed; its defining feature is the fulfilment of calculations in a finite field $GF(3^s)$ by a modulo of an irreducible polynomial of power s that allows to correct distortions of two types – errors and erasures, and enables data recovering when up to 37.5% of the area of the barcode is damaged.

For the first time, the two-layer barcoding method that allows to encode two independent sets of data, as well as the algorithms for forming two-layer barcodes with three gradations of colour, which distinctive feature is the use of specific procedures for determining a control bit for encoding the second data set and making a two-layer barcode that provides a delimitation of access to the information, are developed.

The main results of the dissertation **were published** in 7 scientific papers, in particular, in 5 scientific articles, including 1 article published in a foreign scientific journal of the third quartile (Q3), which is indexed in the Scopus database, 1 article published in a scientific journal of the country, which is a part of the Organization for Economic Cooperation and Development and the European Union, 1 article published in a scientific journal included in the list of scientific journals of Ukraine in category «A», and 2 articles published in scientific journals included in the list of scientific journals of Ukraine in category «Б», as well as in 2 materials of scientific and technical conferences, including 1

paper in the proceedings of the international scientific conference indexed in Scopus database.

Keywords: application software, software architecture, software design pattern, logistics software system, automatic object identification, barcoding.

Список публікацій здобувача / list of publications of the applicant:

Стаття у закордонному фаховому виданні третього квартиля (Q3), яке проіндексоване в базі даних Scopus / the article published in a foreign scientific journal of the third quartile (Q3), which is indexed in the Scopus database:

1. Dychka, I., Sulema, O., Salenko, A., Sulema, Y. Augmented Reality Application Based on Information Barcoding. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Nature Switzerland AG. 2021. Vol. 1192, P. 750–761. ISSN : 21945357.

Стаття у періодичному науковому виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу / the article published in a scientific journal of the country, which is a part of the Organization for Economic Cooperation and Development and the European Union:

2. Ivan Dychka, Olga Sulema. Black-Gray-White Barcode Based on Error Correction Data Encoding. Journal of Applied Computer Science. Poland, Lodz, 2019. Vol. 27, No. 2. P. 17–38. ISSN : 1507-0360.

Стаття у виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А» / the article published in a scientific journal included in the list of scientific journals of Ukraine in category «A»:

3. Dychka I., Onai M., Sulema O. Data Compression in Black-Gray-White Barcoding. Radio Electronics, Computer Science, Control, 2020. No 1, P. 125–134.

Статті у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б» / the articles published in scientific journals included in the list of scientific journals of Ukraine in category «Б»:

4. Onai M.V., Sulema O.K., Dychka A.I. Data Encoding Based On Tricolor Matrix Barcodes. KPI Science News, 2019. Vol. 2, P. 37–45.
5. І. А. Дичка, О. К. Сулема, А. А. Крайносвіт. Програмна система логістичного обліку на основі дворівневого штрихового коду. Системні технології, 2020. № 6, С. 28–38.

Публікація у матеріалах міжнародної наукової конференції, що проіндексовані у базі даних Scopus / the publication in the proceedings of the international scientific conference indexed in Scopus database:

6. Dychka, I., Sulema, O. Data compression and representation as multicolor barcodes. CEUR Workshop Proceedings, 2019. Vol. 2393, P. 534–541.

Публікація у матеріалах наукової конференції / the publication in the proceedings of the scientific conference:

Сулема О.К. Спосіб ущільнення даних при поданні інформації у вигляді триколірних двовимірних штрихових кодів. Десята наукова конференція магістрантів та аспірантів, Київ, 21–23 березня 2018 р. Збірник тез доповідей. Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського». Київ : Просвіта, 2018. С. 268–272. ISBN 978-617-7010-14-1.