

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 519.95

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ ЗАСОБАМИ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Вислоух С.П., Чабан О.М., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Розглядаються питання вибору ефективного методу моделювання роботи виробничих систем. В якості такого методу пропонується використовувати мережі Петрі. Наведено узагальнений алгоритм моделювання та оптимізації завантаження обладнання виробничої системи й результати апробації запропонованої методики

Вступ

Розробка методів моделювання та оптимізації роботи виробничих систем є перспективною науково-технічною задачею. Вона має велике значення, оскільки практичне застосування оптимізаційних методів для створення оптимальної структури виробничої системи дозволить зменшити витрати на виробництво, а отже знизити собівартість виготовлення виробів, не вкладаючи значних коштів в переоснащення обладнання, розробку технологічного оснащення тощо. Тому необхідно мати універсальний математичний апарат, який дозволив би швидко та зручно моделювати виробничу систему, визначити ефективність її роботи й визначити оптимальну структуру системи. В сучасних умовах досить раціональним та перспективним методом моделювання роботи виробничих систем є імітаційне моделювання, що використовує апарат мереж Петрі. Цей метод дозволяє досить швидко формалізувати та обробити великі потоки інформації, які мають місце в сучасних виробничих системах, легко моделювати складні зв'язки між компонентами системи, виконувати оптимізацію роботи за вибраними критеріями [1].

Постановка задачі та моделювання виробничої системи

Мережа Петрі є графічним й математичним засобом моделювання, який можна застосувати до виробничих систем різноманітних типів. В якості графічного засобу мережі Петрі доцільно використовувати для наочного представлення систем, що моделюються, подібно блок-схеми, структурної схеми та мережевого графіка. Поняття фішок, що вводиться в мережах Петрі, дозволяє моделювати динаміку систем та паралельні процеси. В якості математичного засобу аналітичне представлення мереж Петрі дозволяє створити рівняння стану системи, алгебраїчні рівняння та інші математичні співвідношення, що описують динаміку системи.

Першим кроком на шляху побудови моделі виробничої системи є абстрагування від конкретних фізичних і функціональних особливостей її компонентів.

Компоненти системи і їхні дії представляються абстрактними подіями.

Взаємодія подій у великих системах має, як правило, складну динамічну структуру. Ці взаємодії описуються більш просто, якщо вказати не безпосередні зв'язки між подіями, а ті ситуації, при яких дана подія може реалізуватися. При цьому глобальні ситуації в системі формуються за допомогою локальних операцій, що називаються умовами реалізації подій.

Умова має ємність (стан): умова не виконана (ємність дорівнює 0), умова виконана (ємність дорівнює 1), умова виконана з n -кратним запасом (ємність дорівнює n , де n – ціле додатне число). Визначені сполучення умов дозволяють реалізувати деякій події (передумови події), а реалізація події змінює деякі умови (постумови події), тобто події взаємодіють з умовами, а умови – з подіями [2].

Отже передбачається, що для вирішення зазначених на початку задач, досить представляти дискретні виробничі системи як структури, що утворені з елементів двох типів – подій і умов.

У мережах Петрі події та умови представлені абстрактними символами з двох непересічних алфавітів, що називаються відповідно множиною переходів та множиною місць. У графічному представленні мереж переходи зображуються "бар'єрами", а місця - колами. Умови-місця і події-переходи зв'язані відношенням безпосередньої залежності (безпосереднього причинно-наслідкового зв'язку), що зображується за допомогою спрямованих дуг, що ведуть з місць у переходи і з переходів у місця. Місця, з яких ведуть дуги на даний перехід, є його вхідними місцями. Місця, на які ведуть дуги з даного переходу, є його вихідними місцями.

Динаміка функціонування системи, що моделюється, знаходить своє відображення у роботі мережі Петрі. Неформально роботу мережі можна представити як сукупність локальних дій, що є спрацьовуваннями переходів. Вони відповідають реалізаціям подій і призводять до зміни розмітки місць, тобто до локальної зміни умов у системі.

Перехід може спрацювати, якщо виконані всі умови реалізації відповідного події. Наприклад, для так званих ординарних мереж Петрі (окремий випадок прийнятої в даний час версії мереж Петрі) всі вхідні місця переходу повинні містити хоча б по одній фішці.

Спрацьовування переходу – неподільна дія, що змінює розмітку його вхідних і вихідних місць у такий спосіб: з кожного вхідного місця вилучається по одній фішці, а в кожне вихідне місце додається по одній фішці. Тим самим реалізація події, що відображається переходом, змінює стан (ємність) безпосередньо зв'язаних з ним умов так, що ємність передумов, що викликали реалізацію цієї події, зменшується, а ємність постумов, на які воно впливає, збільшується. Перехід може спрацювати, тому що обидва його вхідних місця містять фішки, а після спрацьовування розмітка його вхідних і вихідних місць змінюється.

Якщо два (і більше) переходи можуть спрацювати, і вони не мають загальних вхідних місць, то їхні спрацьовування є незалежними діями, що здійснюються в будь-якій послідовності.

Якщо кілька переходів можуть спрацювати і мають загальне вхідне місце, то спрацьовує тільки один, будь-який з них. При цьому може виявитися, що,

спрацювавши, цей перехід позбавить можливості спрацювати інші переходи. Таким способом у мережі моделюється конфлікт між подіями, коли реалізація однієї події може виключити можливість реалізації інших. У мережі не вказується, яким чином конфлікт можна вирішити. Вважається, що рішення про те, яке з конфлікуючих подій варто реалізувати, приймається поза формалізмом мережі, тобто поведження мережі носить не повністю визначений характер [3].

Отже, мережі Петрі формалізують поняття абстрактної системи – динамічної структури з подій і умов. У загальній теорії мереж апарат Петрі розглядається як один зі способів мережного моделювання систем. Вводяться більш загальні мережні моделі. Їхню єдину основу утворює поняття не інтерпретованої орієнтованої мережі з умов і подій, яка описує тільки статичну будову системи. Самою загальною в спектрі динамічних мережних моделей є, умовно - подійна система, що є мережею, яка доповнена правилами змін умов у результаті реалізації подій. Мережу Петрі можна вважати конкретизацією умовно - подійної системи.

На основі зазначеного умовно - подійного підходу, який є базисом апарату мереж Петрі, було розроблено систему моделювання та оптимізації роботи виробничих об'єктів. Система складається з двох модулів. Перший модуль цієї системи дозволяє здійснювати оптимізацію роботи цеху механічної обробки шляхом знаходження індивідуального маршруту пересування кожної деталі з партії по верстатах з урахуванням можливості виконання поточної операції на даному верстаті. В результаті мінімізується час простою кожної одиниці обладнання, задіяного при виготовленні деталей. Як наслідок, відбувається значне скорочення виробничих витрат, що відображається на собівартості продукції та її конкурентоспроможності на ринку.

Другий модуль системи дозволяє проводити моделювання роботи складального цеху та визначати час простою на кожному робочому місці. Ця інформація може використовуватися в якості керуючої при організації зв'язків між робочими місцями та вносити певні корективи в розподілення операцій на переходи та прив'язки їх певних робочих місць з метою пошуку найбільш раціональної структури виробничої системи. Кінцевою метою є мінімізація часу простою кожного з робочих місць.

Узагальнений алгоритм аналітичного моделювання та оптимізації роботи виробничих систем наведено на рис. 1. Головне вікно створеної системи та вікна введення початкової інформації представлені на рис. 2 – рис. 5.

Апробація системи здійснена на реальних технологічних процесах виготовлення деталі та складання приладу.

Внаслідок застосування даної системи при оптимізації роботи цеху механічної обробки при виготовленні деталі „Корпус” вдалося зменшити цикл виготовлення партії деталей з 588,16 год. (при класичній організації виробничого процесу) до 346,95 год. (при використанні організаційних даних, отриманих при використанні розробленої системи). Також спостерігалось суттєве скорочення часу простою кожного з робочих місць.

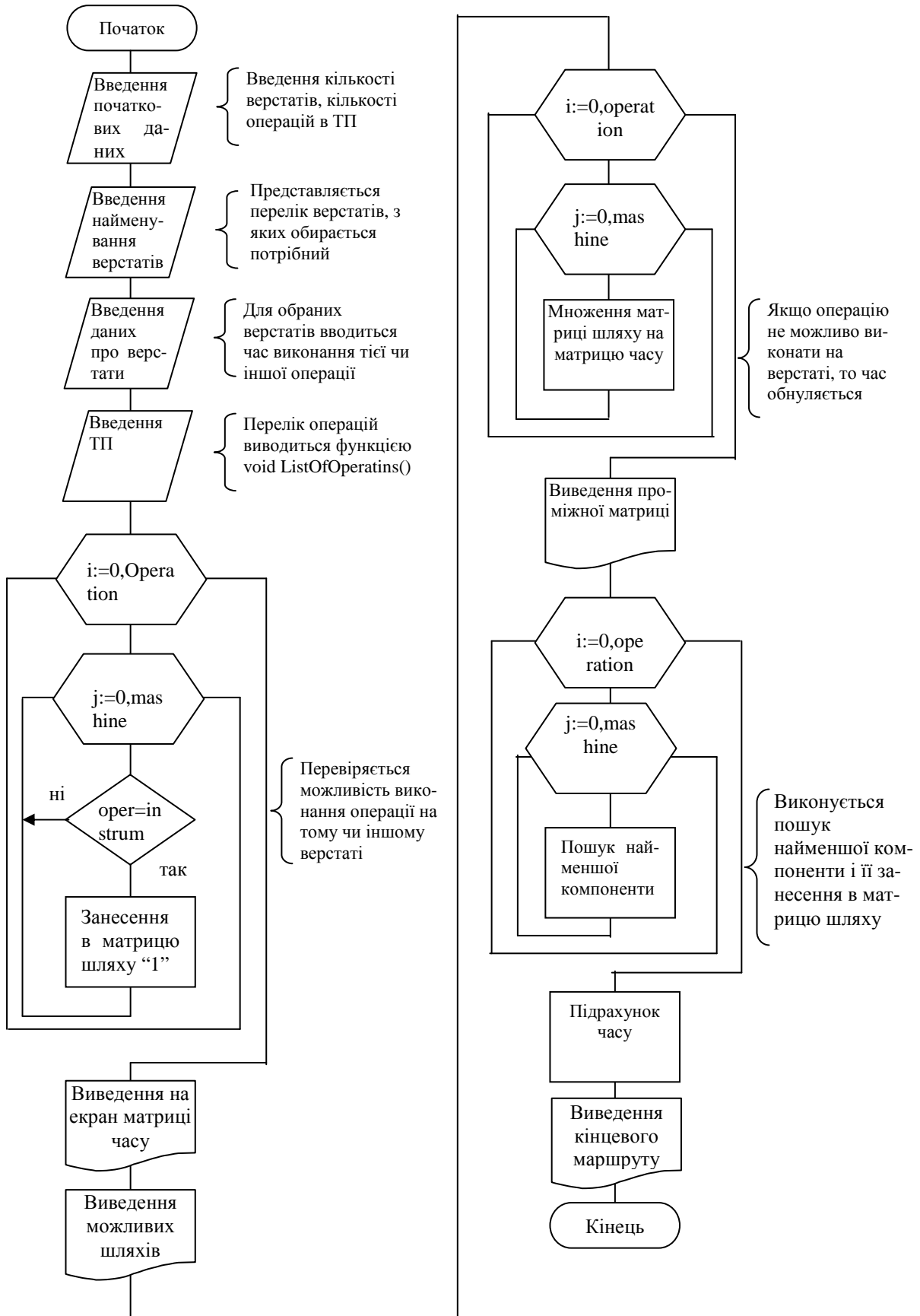


Рис. 1. Узагальнений алгоритм моделювання та оптимізації завантаження обладнання виробничих систем

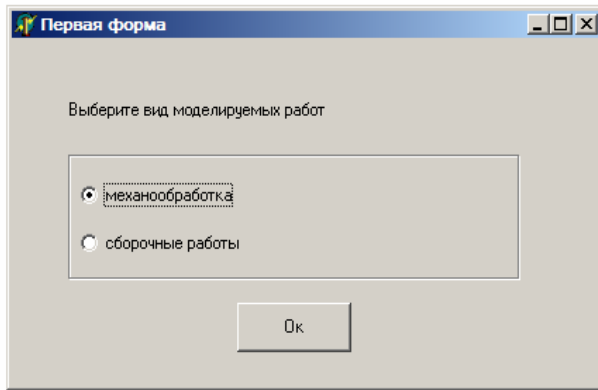


Рис. 2. Вікно вибору виду системи, що моделюється

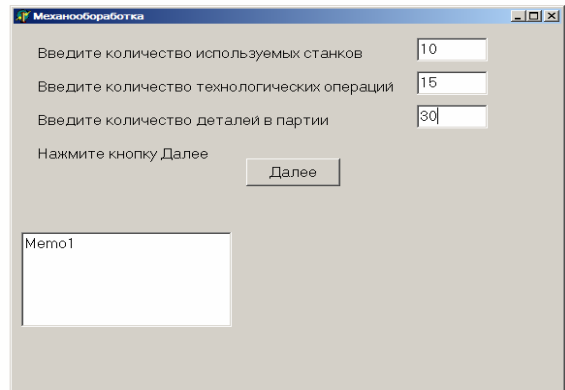


Рис. 3. Вікно введення початкових даних

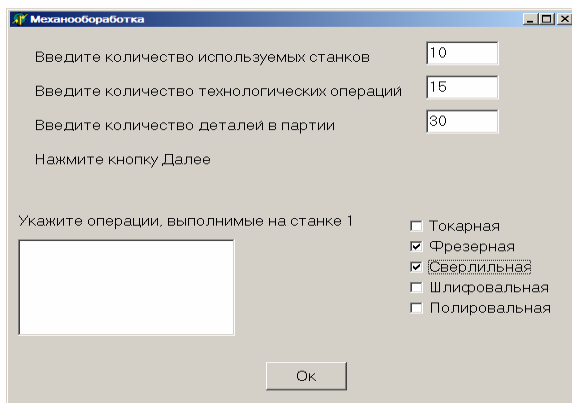


Рис. 4. Вікно введення додаткових даних

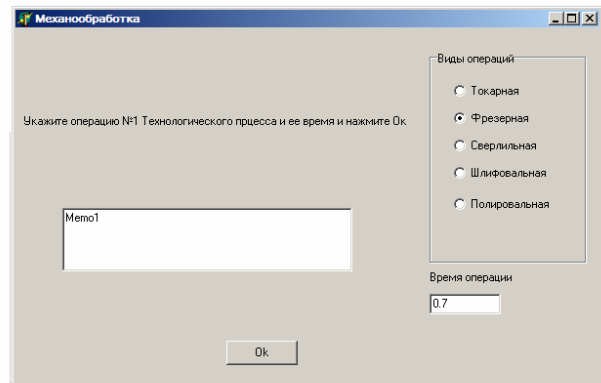


Рис. 5. Вікно введення часу виконання кожної операції

Крім того, проведено моделювання роботи складального цеху. Результатом моделювання є час простою кожного з робочих місць, а також тривалість виготовлення всієї партії виробів. Ця інформація дозволяє виконати аналіз та прийняти відповідні рішення стосовно структури та організації процесу складання.

Висновки

Розроблена система автоматизованого моделювання та оптимізації роботи виробничих систем з використанням апарату мереж Петрі показала себе надійним та універсальним засобом, що є досить зручним у використанні та не потребує особливих навичок.

Результати випробувань системи на реальних технологічних процесах в реальних виробничих умовах показали, що її використання забезпечує значне скорочення часу виготовлення деталей приладів та виробів в цілому. Таким чином з'являється можливість економити матеріальні та фінансові ресурси, що відображається на кінцевій вартості виробів, що виготовляються.

Розроблену систему рекомендується використовувати, якщо є нагальним питання найбільш ефективної побудови виробничої системи та зменшення простою технологічного обладнання, що може бути обумовлене великими об'ємами виробництва та складністю міжкомпонентних зв'язків системи.

В подальшому планується виконати низку робіт з адаптації розроблених методик моделювання та оптимізації й створеної автоматизованої системи в комплексну автоматизовану систему технологічної підготовки виробництва.

Література

1. Тамм Б.Г. и др. Анализ и моделирование производственных систем / Б.Г. Тамм, М.Э. Пуусепп, Р.Р. Таваст; Под общ. ред. Б.Г. Тамма. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.
2. Питерсон. Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
3. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 158 с.

<p>Вислоух С.П., Чабан О.М. Моделирование и оптимизация работы производственных систем средствами сетей Петри Рассматриваются вопросы выбора эффективного метода моделирования работы производственных систем. В качестве такого метода предлагается использовать сети Петри. Приведен обобщенный алгоритм моделирования и оптимизации загрузки оборудования производственной системы и результаты апробации предложенной методики.</p>	<p>Vysloukh S.P., Chaban O.M. Modeling and optimization of systems productions work as methods of the networks of Petri The questions of productions system work design effective method choice are examined. As such method it is suggested to use the networks of Petri. The generalized algorithm of design and optimization of load of equipment of the production system and results of the offered method approbation is given.</p>
--	--

Надійшла до редакції
25 грудня 2007 року

УДК 004.75, 004.724.2

THE POSSIBILITY OF REPORTED TRAFFIC FORGERY ON PRIVATE BITTORRENT TRACKERS

Poryev G.V., Poryev V.A., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute", Kyiv, Ukraine

The overview of the development of concept of peer-to-peer networks is given while historical trends of its progress are analyzed. The content's lifecycle and load-balancing techniques in BitTorrent networks are reviewed. It is shown that the traffic reports on private trackers could easily be forged

Introduction

The concept of peer-to-peer networks, not nearly new at the beginning of XXI century, was briefly outlined in the times of Internet very inception back in 1969. Although the contributors in ARPA could not possibly have predicted the future scale of

worldwide distribution of what was then a single link between just two mainframe computers, the idea of interconnected peer nodes was already there.

It should be noted though, user interface terminals at the time were nowhere near to compare with host computers (mainframes), and were essentially lacking any computing and storage facilities whatsoever, hence the vision of peering networks remained dormant for long time since.

Only as the mainstream computers surged into the consumer market during 1970s and 1980s, the legacy of what we know today as “client-server architecture” was to be dominant for decades to come. It was assumed that should there be a network, it is naturally divided into servers (that provide access to resources) and clients (that make use of provided resources). The performance and capacity gap between server and client hardware and, which is more important, a difference between network inter-connections was still too obvious.

At that time, peering was common practice when dealing with server software and network architecture. TCP/IP routing schemes was essentially peering to the point that the very word “peering” made it into the specific technical term on inter-networking routing, despite the fact that actual physical channels had (and still have) visible relevance to national backbones and traffic exchange points, making them more or less subordinate to each other. However, Usenet and e-mail servers were communicating with each other and there were no such thing as primary layer or central hub(s) through which all traffic should be passed — which is peering network.

Outside of Internet, attempts to build peering networks were also undertaken. One of the most successful of those attempts was FidoNet — amateur worldwide computer network, initially consisting of independent bulleting board systems (BBS), built on packet-switching principle over regular telephone lines using dialup modems. Unlike Internet, FidoNet is not online-network and all user interaction could be and mostly done in offline state. Host software, however, is required to maintain online availability during the certain policy-defined hours each day.

Right upon emerging, the FidoNet was truly peering, in the sense that each originating node accessed its addressee directly by calling its address (phone numbers in this case). Later in 1990-x, however, FidoNet had also “suffered” from infrastructure growth, when the network had exploded into thousands of nodes worldwide. These times of FidoNet development were marked with strict hierarchical structure, roughly based on geography and various regulating authorities within the network. It is worth noting, that unlike Internet (IPv4 address space making up 2^{32} addresses, including non-routable and reserved), hierarchical address structure of FidoNet theoretically allowed address space of 2^{48} network nodes alone and 2^{64} connection points in total.

Despite all aforementioned advances and peeks into the future concept, truly peer-to-peer online networks as we understand them today were far from reach before the advent of third millennium.

The commercial grounds for real peer-to-peer networks have appeared not until permanent Internet connections (also called then “leased lines”) built on technologies such as ADSL or DOCSIS gained significant consumer market at homes and offices. In addition, not until average home and office computer hardware was closing to the

average server hardware (often being built from the same parts indeed) was it plausible to build peer-to-peer networks with evenly distributed computing and storage resources [1].

It is widely believed, that commercial applications of the concept started to appear and gained much popularity in the beginning of XXI century.

Overview of BitTorrent

One of the modern peer-to-peer network protocols, BitTorrent, was conceived in 2001 and to date remains responsible for largest part of consumer-generated Internet traffic, sometimes prompting Internet Service Providers (ISPs) to implement special, often unpopular, filtering measures and devices.

Unlike other popular peer-to-peer networks such as eDonkey2000 or Gnutella networks, BitTorrent does not constitute a single addressing or naming space. It is not even a network itself, because BitTorrent operates as multitude of independent content-tracking servers, called “trackers”. Each tracker maintains the list of published content entities, and for each entity, it maintains the list of peers associated with it. Most trackers do not communicate with each other, as eDonkey2000 servers do, unless they are sharing same content and are specially designed to exchange information among themselves.

Due to the absence of overhead related to maintaining global naming or addressing space, BitTorrent networks are quite faster in comparison with eDonkey2000 or Gnutella in terms of download and upload speed and length of download queues. BitTorrent clients are most likely to consume their bandwidth to exhaustion, despite the fact that BitTorrent does not imply sophisticated load-balancing algorithms for upload, reward scores and so on [2].

Typical content lifecycle in BitTorrent could be described as the following:

1. Preparation — content publisher prepares torrent file, which describes the number, names and size of files and the control checksums of each slice of binary stream made up from content files.

2. Publication — publisher uploads torrent file in such a way that tracker became aware of its existence, not necessarily knowing all the details specified in the torrent file.

3. Distribution — publisher distributes torrent file among clients who wish to download its content. It is usually done through web-based forums, either public or private or via other means. It is worth noting that publication and distribution is not the same process, although in most cases they are done simultaneously in the scope of one server. For example, uploading torrent file as file attach to the message on forum automatically registers torrent contents in the tracker.

4. Initial seeding — publisher running BitTorrent-compliant client starts accepting incoming requests for content.

5. Leeching — other clients proceed to download published torrent file, requesting tracker for the address of initial seeder and requesting initial seeder for content.

6. Downloading — clients actively downloading content file will enable already downloaded slices to be shared among other clients, effectively speeding up the transfer for them.

7. Secondary seeding — clients that completed the download, engage in seeding it by themselves.

8. End of interest — all involved clients finishes and became seeders, and no downloading clients are left in the swarm.

9. Fadeout — seeders stop seeding one by one, and eventually there are neither seeders nor downloading clients associated with this torrent.

Once the content entity is fully downloaded (the transition between stage 6 and 7), the BitTorrent client must ascertain the data integrity of it. In this part BitTorrent specification seems to be slightly under-developed in comparison with its counterparts of eDonkey2000 and Gnutella networks. While the latter does use sophisticated tree-hashing algorithms designed to minimize traffic overhead, BitTorrent simply calculates hashing stream from binary stream with variable-sized chunks. If an error is detected, the whole chunk needs to be re-downloaded.

Analysis of Load-Balancing technique

Most peer-to-peer network will eventually encounter the phenomenon called “leeching”. The network client involving in leeching will only download content and not share it among others. Although such behavior is necessary for some time just after initial publication of the content (since some time is required to download at least one complete shareable piece of data), leeching beyond necessary period and for long time is considered bad, because it forces excess resource usage on other clients interested in the same content [3].

Peer-to-peer networks often employ various sophisticated algorithms to discourage leeching.

One of prominent example is the credit reward system found on popular eDonkey2000 clients. Such clients maintain a “performance record” for each incoming client, who expressed interest in published content.

Typically, incoming clients are arranged into queue in order of time of their appearance. The foremost client in queue is served by the content piece and then re-scheduled at the end of queue, therefore advancing other queue members.

However, incoming client can advance queue member by more than single step in the queue, taking into account its contribution (in case the sharing client is not completed seeder, of course). That is, the more content pieces were provided by the incoming client, the faster it progresses in the queue. This effectively places “bad” leechers to the end of queue and slows their advance.

Unfortunately, no such reward system is currently employed by the majority of the BitTorrent clients. There are number of reasons for it, including the aforementioned difference in distribution speed (BitTorrent content usually distributes faster than comparable eDonkey2000 counterpart due to small size of swarm). However, similar scheme are designed in so called “private trackers”.

As BitTorrent is developing technology, new protocol extensions are constantly added to improve the overall efficiency of content sharing. These include, for example, so-called “Fast Peer Extensions” to allow new peers bootstrap into swarm more rapidly. Although it is uncertain whether the performance itself is nearly topping its potential for the current BitTorrent development stage, it is beyond the scope of this paper.

Public vs. Private Trackers

Roughly, trackers can be called “public” or “private”. Public tracker, such as famous Sweden-based ThePirateBay usually does not require invitation or registration to be able to download its advertised content, therefore do not maintain download and upload rating records of its users.

In contrary, private trackers, such as Torrents.Ru, do implement some restrictions against anonymous access. This is possible using so-called private keys — special passwords attached to the announce URL of tracker, designed so that tracker could ascertain the user identity of every announce or update request coming from BitTorrent clients.

Private trackers often employ rating system, where rating is a value calculated using various formulas including overall download and overall upload amount of a particular user. Users with low rating are restricted from further downloading or they are potential candidates to be banned from tracker. Users with high rating have certain privileges such as ability to download more torrents simultaneously, priority to access and search across tracker, etc.

Hence in order to encourage content sharing and discourage leeching, tracker server must somehow be made aware of how much some particular BitTorrent client did download and upload to others. This is currently made by issuing special HTTP request (“tracker updates”) to the tracker. Such requests usually contain user identity, content identity (hash), client activity state, amount of downloaded and uploaded data and other relevant information [4].

Analysis of Tracker Update requests

Since BitTorrent specification is open to the public community, it is known that any part of mentioned information request could be forged or faked, and therefore used to “illegally” boost the user rating. However, because this would require significant level of software engineering knowledge, the fact is not widely known.

Let us consider an example of tracker update (long lines were split for the reader’s convenience):

```
GET /announce.php?uk=3b02d5XTYZ&
&info_hash=%da%5d%a4H%20%e6%d23%25%cag%b9%10x%3f.%a0%ffk%e9
&peer_id=-UT1750-%fa%91%07%e1%10n%c3O%96%d1%be%3b
&port=8080
&uploaded=311181312
&downloaded=0
&left=0
&key=8AA14C62
```

&numwant=200

&compact=1

&no_peer_id=1

HTTP/1.1

Host: bt.torrents.ru

User-Agent: uTorrent/1750

Accept-Encoding: gzip

The most significant parts of tracker update are described below:

uk — stands for “user key”, identifies user within private tracker.

info_hash — primary hash for torrent content.

peer_id — client software id (UT1750 means μ Torrent 1.7.5.0).

port — port at which client software accepts incoming requests.

uploaded — amount of data uploaded in the scope of this torrent.

downloaded — amount of data downloaded in the scope of this torrent.

left — amount of data required to complete torrent.

We see, that amount of data downloaded and uploaded are reported to private tracker server by the client. Tracker server cannot validate this claim directly, because it does not know exactly, which peer is downloading or uploading to which peer in the swarm. Even indirect calculations, based on the estimation of number of leeching, downloading, and finished clients and overall traffic they reported, could be dramatically wrong because some clients might have cancelled downloads or there may have been communication issues between tracker and clients, but not among clients themselves, as often happens in large home networks.

Conclusion and recommendation

There are number of ways in which reported “downloaded” and “uploaded” values could be faked. Most flexible but terribly time-consuming process would involve development of own BitTorrent client or modifying existing open-source client. Other way, sometimes described in hacking-related forums on the Internet, would require interfering with active connection between client and tracker, suppressing legit tracker update request and inserting forged one in its place. This too, however, requires deep understanding of TCP/IP implementation and reverse-engineering skills.

We hope that future generations of BitTorrent protocol will employ sophisticated methods to block this type of “attack”.

References

1. Stephanos Androutsellis-Theotokis, Diomidis Spinellis. A Survey of Peer-to-Peer Content Distribution Technologies // ACM Computing Surveys, — 2004. — 36(4). — P.335–371.
2. Stefan Saroiu, P. Krishna Gummadi, Steven D. Gribble. A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems. Technical Report UW-CSE-01-06-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, July 2001.
3. Poryev G.V. The Application of the Peer-to-Peer Network Technologies // Proceedings of Scientific Workshop of Donetsk National Technical University. Issue #12(118) “Computing Technology and Automation”. — DNTU, Donetsk (Ukraine), 2007. — p.150.
4. Poryev G.V. Data Integrity Control in the Distributed Networks // Western-European Magazine on Advanced Technologies. Issue #4/2(22). — KNURE, Kharkiv (Ukraine), 2006. — P.32-35.

Порев Г. В., Порев В.А. Возможность подделки отчётов трафика в частных трекерах BitTorrent Выполнен краткий обзор развития пиринговых сетей и его исторических тенденций. Проанализирован жизненный цикл контента и способы распределения нагрузки в сетях BitTorrent. Показано, что отчёты трафика в частных трекерах BitTorrent могут быть подделаны.	Порев Г.В., Порев В.А. Можливість підробки звітів трафіку в приватних трекерах BitTorrent Виконано короткий огляд розвитку пінгвових мереж та його історичних тенденцій. Проаналізовано життєвий цикл контенту та способи розподілу навантаження в мережах BitTorrent. Показано, що звіти трафіку в приватних трекерах BitTorrent можуть бути підроблені.
---	---

Надійшла до редакції
25 квітня 2008 року

УДК 621:658

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПРІОРИТЕТНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ ВИРОБУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Стельмах Н.В., Румбешта В.О., Барабаш Я.В., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

У роботі запропоновано методику вибору найбільш трудомісткого вузла виробу з використанням теорії нечітких множин на підставі експертних оцінок

Вступ

Сучасні темпи науково-технічного прогресу потребують більш динамічної гнучкості виробничої структури та технології. В умовах зростаючої конкуренції успіх будь-якого підприємства залежить від швидкості реагування на постійні зміни в зовнішньому середовищі, від стабільності забезпечення виробництва необхідними ресурсами.

Однією із основних можливостей зниження витрат на виробництво є скорочення терміну підготовки та прискореного початку випуску нових виробів без погіршення якості робіт підготовки.

Оскільки сучасне виробництво на приладобудівних і машинобудівних підприємствах України має дрібносерійний характер і характеризується великою номенклатурою виробів, великою кількістю споживачів, терміновістю виконання замовлень з можливими індивідуальними вимогами до приладу, стійкістю термінів освоєння нової продукції, більш питомою вагою етапу технологічної підготовки виробництва, то необхідно враховувати всі ці особливості у виробничому циклі виготовлення виробів.

Типовим явищем на сьогодні є неефективне використання і засобів виробництва, і трудових ресурсів на підприємствах. Як наслідок маємо нераціональне завантаження обладнання, складальних місць та втрату часу через затримку готових деталей на складах, що значно подовжує цикл випуску виробів [1].

У приладобудуванні через особливу специфіку технологічних процесів складання є основним виробничим процесом, що визначає якість продукції.

Оскільки підготовка складальних робіт значно більш, трудомістка і складна ніж підготовка і випуск готових деталей, то визначальним чинником при отриманні перших виробів є особлива підготовка технологічного процесу складання, яка і визначає напрямок проведення всього комплексу робіт.

Постановка задачі. Чинники впливу на трудомісткість складальних одиниць

В зв'язку з цим метою статті є розгляд прикладу застосування методики оцінювання трудомісткості складання виробів на базі математичного апарата нечіткої логіки та використання нечітких множин.

Практичні успіхи нечіткого керування одержали теоретичне обґрунтування. Сьогодні нечітка логіка розглядається як стандартний метод моделювання й проектування. Системи на нечітких множинах розроблені й успішно впроваджені в багатьох сферах людської діяльності.

Практичний досвід розробки систем на нечітких множинах свідчить, що строки й вартість їхнього проектування значно нижче, ніж при використанні традиційного математичного апарата, при цьому забезпечуються необхідні рівні якості.

Особа, що приймає рішення (ОПР), не завжди може об'єктивно оцінити рівень якості отриманого рішення, а тим більше вибрати з декількох рішень найкраще. З метою підвищення рівня об'єктивності оцінки рівня складності виготовлення вузла виробу в найбільш складних ситуаціях можна залучати експертів [2]. Однак ця методика повністю виключає можливість врахування індивідуальних думок про важливість кожного критерію для ОПР. Залучаючи експертів, необхідно мати на увазі, що експерт при проведенні оцінок вільно або мимоволі враховує не застережені в процедурі експертизи ознаки.

У таких випадках можливе використання методики ранжирування альтернативних варіантів [3] для рішення питання про вибір найбільш трудомісткого вузла виробу. Пропонована методика ранжирування, заснована на теорії нечітких множин, дозволяє значно знизити суб'єктивний вплив експерта на прийняте рішення, зокрема, виключити можливість врахування не передбачених у процедурі експертизи аспектів.

Для рішення завдання оцінки й вибору найбільш трудомісткого вузла виробу за даною методикою варто визначитися з набором критеріїв, за якими оцінюватиметься пріоритетність виготовлення складальних одиниць виробу. При виборі критеріїв оцінки враховуються основні чинники впливу на тривалість виготовлення складального вузла виробу: кількість деталей вузла, коефіцієнт технологічності вузла, трудомісткість складальних робіт, тривалість циклу складання та випробувань. При застосуванні даної методики в інших умовах можливий і інший набір критеріїв [3], обумовлений користувачем методики, що є незаперечною її перевагою.

Після визначення набору критеріїв визначимося зі складом групи експертів,

що проводять експертизу, і з вагою кожного експерта, якщо це необхідно. Кожний експерт повинен висловити свою думку про важливість критеріїв.

Остаточне рішення про вибір пріоритету виготовлення вузлів виробу приймається головним технологом підприємства.

Критерії, які можуть враховуватися при ухваленні рішення про вибір пріоритетності виготовлення вузлів виробу рекомендуються наступні:

1. Кількість деталей у вузлі. Найбільш складними є вузол з максимальною кількістю деталей.

2. Коефіцієнт технологічності вузла. Коефіцієнт технологічності вузла залежить як від рівня уніфікації деталей, що збираються, так і від коефіцієнта уніфікації складальних операцій. Вузол з найнижчим коефіцієнт технологічності вважається найскладнішим. Якщо є вузли з однаковим показником технологічності, то враховується кількість деталей у вузлі, і чим більша кількість деталей, тим вищий ранг вузла по критерію технологічності.

3. Трудомісткість складальних операцій. Цей критерій визначається трудомісткістю всіх складальних операцій процесу виготовлення і залежить від показника уніфікації складальної операції та рівня кваліфікації фахівця виконавця [4].

Якщо є вузли з однаковими показниками по тривалості циклу складання та випробувань, то враховується тривалість циклу регулювання та випробування кожного вузла. Час випробувань переривається на час дорегулювання, так як після першого випробування вузли, що не пройшли випробувань за визначеними параметрами, повертаються знову на перескладання та регулюються і налагоджуються, а потім знову проходять випробування.

В такому випадку необхідно ввести коефіцієнт k – показник вірогідності повернення виробу на повторні випробування. Тоді цикл складального процесу f визначається:

$$f = \left(\sum^n T_{скл} + k \cdot \sum^n T_{випр.} \right) \cdot \frac{1}{n_p}, \quad (1)$$

де k залежить від надійності конструкції і визначається коефіцієнтом інтенсивності відмовлень при випробуваннях.

$$\lambda = \frac{n(\tau)}{N \Delta \tau}, \quad (2)$$

де $n(\tau)$ - кількість приладів (або його окремих елементів), які відмовили протягом певного проміжку часу, $\Delta \tau$;

N - кількість приладів партії (або загальна кількість елементів в одному приладі).

Отже, при виборі пріоритету виготовлення вузлів виробу орієнтуються в основному на кількість деталей у вузлі, коефіцієнт технологічності вузла, трудомісткість складальних операцій та тривалість циклу складання та випробувань.

Основна частина

Як приклад використання запропонованої методики вибору найбільш трудомісткого вузла виробу з використанням теорії нечітких множин на підставі

думок експертів розглянемо гіроскопічний комплекс «Круїз». Центральний прилад гірокомпаса містить п'ять основних вузлів: гіроскопічна секція, платформа, підвіс внутрішній, підвіс, центральний прилад.

Отже, оцінка експерта (провідного фахівця) про важливість критеріїв виготовлення вузлів виробу наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Оцінка важливості критеріїв

Кількість деталей у вузлі	Коефіцієнт технологічності вузла	Трудомісткість складальних операцій	Тривалість циклу складання та випробувань
6	5	10	7

Ранжирування будемо робити відповідно до методики [4] за формулою:

$$\mu(x_i) = \frac{\sum_{y_j \in U} \mu_{A_i}(y_j) \cdot \mu_B(y_j)}{\sum \mu_B(y_j)}, \quad (3)$$

де $\mu_{A_i}(y_j) = \frac{u_j^i}{\max_j(u_j^i)}$ - ступінь наявності j -го ознаки в i -го вузла;

$\mu_B(y_j) = \frac{\omega(y_j)}{\sum_{y_j \in U} \omega(y_j)}$ - ступінь важливості j -го ознаки на думку експерта;

$\mu(x_i)$ - ступінь переваги експертом i -го вузла;

u_j^i - значення критерію y_j в i -ї альтернативи (зазвичай є деякими числами);

$\omega(y_j)$ – бальна оцінка важливості ознаки y_j , на думку експерта.

Для зручності використання методу ранжирування отримані результати записуються в матричній формі.

Провідний фахівець у відповідності зі своїми критеріями оцінює трудомісткість вузлів у такий спосіб (табл. 2).

Таблиця 2 - Оцінка складності виготовлення вузлів ГК «Круїз» провідним фахівцем

Найменування вузла	Кількість деталей у вузлі	Коефіцієнт технологічності вузла	Трудомісткість складальних операцій	Тривалість циклу складання та випробувань
Платформа	3	6	10	7
Підвіс зовнішній	5	5	10	6
Підвіс	6	7	10	6
Гіроскопічна секція	7	8	10	10
Центральний прилад	4	6	10	6

Відповідно до зазначеного вище згідно відомої методики одержимо матрицю, елементи якої мають структуру «критерій - ступінь сумісності критерію та альтернативи»:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.43 & 0.75 & 1 & 0.7 \\ 0.71 & 0.63 & 1 & 0.6 \\ 0.86 & 0.86 & 1 & 0.6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.57 & 0.75 & 1 & 0.6 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

Потім одержимо матрицю, елементи якої мають структуру «критерій - ступінь важливості критерію на думку експерта»:

$$W^T = z_{onm} \cdot \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 0.21 & 0.18 & 0.36 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Знайдемо добуток даних матриць (4) та (5), одержимо матрицю елементів ступеня належності, що визначають перевагу альтернатив:

$$F^T = z \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 0.76 & 0.77 & 0.86 & 1 & 0.77 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Упорядкувавши стовпці за спаданням, одержимо ряд альтернатив: x_2, x_1, x_3, x_4, x_5 .

Отже, відповідно до прийнятих позначень можна сказати, що пріоритетним вузлом для виготовлення, на думку провідного фахівця, є вузол "Гіроскопічна секція".

При участі декількох експертів можливі ситуації, коли спостерігаються розбіжності в думках із приводу важливості критерію. У цьому випадку можливе використання вагового коефіцієнта K_i , що відображає вагу думки i -го експерта в експертній групі з n кількістю людей. Після того як експерти визначилися у своїй думці щодо важливості критеріїв, необхідно знайти оптимальну експертну стратегію α_j^0 по кожному j -му критерію (так звану «оптимальну ступінь важливості»), що знаходиться за формулою:

$$\alpha_j^0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \mu_{B_i}(y_j) \quad (7)$$

Виберемо найскладніший вузол. Допустимо, вибір роблять три експерти (провідні фахівці), що мають однаковий професійний рівень. Наприклад, думки експертів про важливість кожного критерію розподілилися в такий спосіб (табл. 3).

Тоді матриця думок експертів виглядає в такий спосіб:

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} z_1 & z_2 & z_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.23 & 0.21 & 0.14 \\ 0.15 & 0.18 & 0.21 \\ 0.26 & 0.28 & 0.29 \\ 0.23 & 0.25 & 0.31 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

Таблиця 3 - Оцінки експертів про важливість критеріїв

Експерт	Кількість деталей у вузлі	Коефіцієнт технологічності вузла	Трудомісткість складальних операцій	Тривалість циклу складання та випробувань
Експерт 1	6	4	10	6
Експерт 2	6	5	10	7
Експерт 3	4	6	10	9

З огляду на, те що експерти групи мають однаковий професійний рівень, а отже, і вагомість, то згідно прийнятої методики маємо:

$$W^T = z_{omn} \cdot \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 0.19 & 0.18 & 0.28 & 0.26 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F^T = z \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 0.679 & 0.684 & 0.75 & 0.91 & 0.679 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Упорядкувавши стовпці за спаданням, одержимо ряд альтернатив x_2, x_1, x_3, x_4, x_5 . Відповідно до прийнятого раніше позначеннями найбільш трудомістким, а тому пріоритетним є вузол “Гіроскопічна секція”.

Наведемо приклад експертизи із залученням експертів різного професійного рівня [5]. Припустимо, що питання вибору пріоритету виготовлення вузлів виробу вирішується провідним інженером (експерт 1), провідним нормувальником (експерт 2) і начальником відділу (експерт 3). Вагомість характеристики експертів наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вагомість характеристики експертів

Експерт	Вагомість експерта, K_i
Експерт 1	0,3
Експерт 2	0,5
Експерт 3	0,7

Розрахуємо показники оптимальної стратегії та складемо матрицю F:

$$W^T = z_{omn} \cdot \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 0.091 & 0.094 & 0.14 & 0.137 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F^T = z \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 0.346 & 0.346 & 0.381 & 0.462 & 0.345 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Упорядкувавши стовпці за спаданням їх значень, одержимо ряд альтернатив x_2, x_1, x_3, x_4, x_5 . Відповідно до прийнятого раніше позначеннями самим трудомістким, а тому пріоритетним є вузол “Гіроскопічна секція”.

Висновки

Запропонований метод вибору альтернативного варіанта по порівнюваних конкуруючих альтернативах із залученням експертів, дозволяє підвищити рівень об'єктивності оцінки складності виготовлення вузла виробу [5].

Подальші дослідження спрямовані на застосування даної методики до побудови гнучкої автоматизованої системи прискореної підготовки складального виробництва. Така система дозволить більш раціонально організувати підготовку механо-складального виробництва, тим самим скоротивши цикл випуску першої партії виробів.

Література

1. Румбешта В.О. Стельмах Н.В. Принцип гнучкості в структурі сучасної технологічної підготовки виробництва. Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. 2/2007 НТУ «ХПІ», Харків.
2. Алиев Р.А. и др.. Управление производством при нечеткой исходной информации. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 238 с.
3. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б./ Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта – М.: Наука, 1986. – 311 с.
4. Румбешта В.О. Основи технології складання приладів: Підручник . - К: ІСДО, 1993. – 303 с.
5. Поспелов Д.А. Модели выбора альтернатив в нечеткой среде // Тез. докл. – Рига: РПИ. - 1984.

Стельмах Н.В., Румбешта В.О. Барабаш Я.В.
Методика выбора приоритетности изготовления узлов изделия на основе теории нечетких множеств.

В работе предложена методика выбора наиболее трудоемкого узла изделия с использованием теории нечетких множеств на основании мнений экспертов.

Stelmakh N.V., Rumbeshta V.O., Barabash Y.V.
Technique of a choice of the most difficult production unit by use of the fuzzy sets theory on the basis of expert opinions.

The article has devoted to technique of a choice of the most difficult production unit by use of the fuzzy sets theory on the basis of expert opinions.

Надійшла до редакції
1 лютого 2008 року

УДК 681.586+531.76

РОЗВИТОК ТА СТАН МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Казаченко Г.А., Гераїмчук М.Д., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

В роботі проведений аналіз стану та розвитку мікроелектромеханічних систем (МЕМС), розглянуті технологічні процеси їх виготовлення та програмне забезпечення комп'ютерного моделювання МЕМС. Розглянуто існуючі мікропристрої, прилади та системи вимірювання параметрів руху, зокрема, прискорення, а також прилади орієнтації та навігації

Вступ. Постановка задачі

Початок нового століття у сфері приладобудуванні характеризувався бурхливим розвитком нового напрямку мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Головним у цьому напрямку є застосування мікротехнологій, адаптованих на виробництво складних інтегрованих пристроїв і систем.

Можливості прецизійної обробки матеріалів, групова технологія формування приладів, інтеграція механічної й електричної частин приладу (від чутливого елемента на вході схеми до підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, мікропроцесора у тракті обробки інформації та виконавчого пристрою на виході), а також різноманітність технологічних процесів є незаперечними перевагами використання досягнень мікроелектроніки при виготовленні мікроелектромеханічних елементів і систем.

МЕМС характеризуються надзвичайно малими масою і габаритами, мають високі динамічні характеристики, малу інерційність, мале енергоспоживанням, низьку вартість і одночасно високу стійкість до зовнішніх впливів.

Необхідно відзначити, що МЕМС є досить складними пристроями, для проектування й оптимізації функціонування яких, необхідно використовувати комп'ютерне моделювання.

Одним з важливих напрямків використання МЕМС є мікроколивальні системи - акселерометри і гіроскопи, датчики кутової швидкості, мультисенсорні датчики. Вони знаходять широке застосування на транспорті, в медицині в промислових системах вимірювання і управління, в інерційних системах навігації (ракетно-космічна техніка, авіаційна техніка), машинобудуванні, енергетиці, нафтогазовій техніці, системах комп'ютерної безпеки, інтелектуальних переносних пристроях, а також в системах віброконтролю, діагностиці та моніторингу.

Промисловість виготовляє багато різновидів МЕМС датчиків параметрів руху, що мають різні принципи дії, діапазони вимірювання, масу, габарити, ціни тощо. Тому важливим є уявлення принципів дії, характеристик, технологій виготовлення існуючих МЕМС.

Загальні характеристики мікроелектромеханічних систем

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) – це маленькі інтегровані пристрої або системи, що поєднують електричні і механічні компоненти. Їхні розміри є у межах від мікрометра до міліметра, їх може бути будь-яка кількість - від декількох елементів до мільйонів у специфічній системі. МЕМС застосовують методи виготовлення, розроблені для промисловості інтегральних схем (ІС), щоб додати механічні елементи типу балок, шестірні, діафрагм, і пружин на пристрої [1]. Також МЕМС - інтеграція механічних елементів, датчиків, приводів, і електроніки на звичайну кремнієву підкладку застосуванням технології мікровиготовлення.

МЕМС - це не тільки одне із застосувань або пристроїв, вони не визначені єдиним процесом виготовлення і не обмежені декількома матеріалами. Вони - підхід виготовлення, що надає переваги мініатюризації, багаторазових компонентів, і мікроелектроніки до проектування і конструювання інтегральних електромеханічних систем. МЕМС є не тільки мініатюризація механічних систем, але також нова парадигма для розробки механічних пристроїв і систем [2].

Ці системи можуть зчитувати, керувати, активізувати механічні процеси в мікромасштабі, функціонувати індивідуально або в множинах, щоб зробити

ефекти у макромасштабі. Мікротехнологія дозволяє виготовлення великих множин пристроїв, що індивідуально виконують прості задачі, але в комбінації можуть виконувати складні функції.

Технології виготовлення МЕМС

Існує три характерних риси технологій виготовлення МЕМС - мініатюризація, множинність, і мікроелектроніка.

Мініатюризація дозволяє виробництво компактних, швидкодіючих пристроїв.

Множинність відноситься до групового виготовлення властивому обробці напівпровідника, що дозволяє легко й одночасно виготовити тисячі або мільйони компонентів.

Мікроелектроніка забезпечує інтелект МЕМС і дозволяє монолітне злиття датчиків, приводів, і логіки, щоб будувати замкнутий зворотний зв'язок компонентів і систем. Успішна мініатюризація і множинність традиційних систем електроніки не були б можливі без технологій виготовлення ІС. Тому, технологія виготовлення ІС, або мікро-виготовлення, була спочатку однією можливою технологією для виробництва МЕМС. Мікророботництво забезпечує могутній інструмент для групової обробки і мініатюризації механічних систем у розмірну область, не доступну звичайними методами механічної обробки. Крім того, мікророботництво забезпечує можливість інтеграції механічних систем з електронікою, щоб розробити високоякісні замкнутого типу керовані МЕМС [3].

МЕМС технологія стирає розходження між складними механічними системами й електронікою інтегральної схеми. Історично, датчики і приводи - сама дорога і ненадійна частина макромасштабних систем електроніки. МЕМС технологія дозволяє цим складним електромеханічним системам бути виготовленими, використовуючи методи групового виготовлення, зменшуючи вартість і збільшуючи надійність датчиків і приводів, щоб зрівняти їх з інтегральними схемами.

МЕМС технологія базується на низці інструментів і методологій, що використовуються, щоб формувати структури з розмірами масштабу мікрметра. Істотні частини технології були прийняті від технології ІС. Наприклад, майже всі пристрої ґрунтуються на пластинах кремнію, подібно ІС. Структури реалізовані в тонких плівках матеріалів, подібно ІС. Вони копіюються, використовуючи фотолітографічні методи, подібно ІС. Є однак кілька процесів, що не отримані з технології ІС, і оскільки технологія продовжує рости, відрив з технологією ІС також зростає. Є три основних стандартних будівельних блоки в МЕМС технології: здатність депонувати тонкі плівки матеріалу на підкладку, копіювати образи на вершини плівок фотолітографічним відображенням, і трукіти плівки вибірково до образів. Процес МЕМС - звичайно структурована послідовність цих дій, щоб формувати необхідні конструкції та пристрої [4].

Моделювання МЕМС

За складністю опису дії мікромеханічні пристрої не уступають напівпровідниковим приладам, а здебільшого є більш складними і менш вивченими. Тому

без використання комп'ютерного моделювання складно та дорого розробляти і виготовляти якісні мікромеханічні пристрої. Проблемі моделювання приділяється досить велика увага як розроблювачами і виготовлювачами мікромеханічних пристроїв, так і розроблювачами програмних продуктів.

Є кілька способів опису дії мікромеханічних пристроїв: від аналітичного опису за допомогою формул до тривимірного моделювання кінцевих елементів. Іноді для рішення задачі оптимізації конструкції і технології виготовлення мікромеханічних пристроїв використовується сполучення декількох способів опису. Найбільший інтерес для розроблювачів мікромеханічних пристроїв представляють пакети програм, що дозволяють вирішувати широке коло задач.

Перший крок при моделюванні мікромеханічних пристроїв є визначення: які фізичні ефекти важливі, і які з цих ефектів є взаємозалежними. Це звичайно визначає вибір програми моделювання, що буде використовуватись. Потім формується геометрія приладу або за допомогою редактора геометрії, або за результатами моделювання технології виготовлення. Після цього включаються вхідні параметри (граничні умови, властивості матеріалу тощо). Властивості матеріалів повинні бути отримані експериментально з тестових структур. Потім може бути виконане моделювання з використанням таких програм, як Abaqus [5], MEMCAD [6], IntelliCAD [7], Solidis [8], Ansys [9]. Для рішення системи диференціальних рівнянь ці програми використовують методи кінцевих елементів, граничних елементів, кінцевої різниці або кінцевих об'ємів. Потім за результатами моделювання формуються спрощені моделі, що застосовуються для розробки систем. Моделювання на системному рівні виконується за допомогою програми моделювання електричних схем SPICE [10], або більш загальних програм Simulink [11] і Saber [12], що використовують стандартну мову опису вхідного файлу для моделювання VHDL-AMS.

MEMS акселерометри

Як зазначалось раніше, одним з найважливіших напрямків використання MEMS є мікроколивальні системи - акселерометри і гіроскопи, датчики кутової швидкості і мультисенсорні датчики. Зважаючи на це розробкою MEMS приладів та систем, що вимірюють та контролюють параметри руху, займаються велика кількість компаній. Світовими лідерами в цій галузі є «Analog Devices», «Sandia National Laboratories», «HDK America Inc.», «Freescale Semiconductor Inc.», «Kionix», «Jewell Instruments LLC» та «Endevco Corp.».

Компанія «Analog Devices» розроблює низку акселерометрів iMEMS® (integrated Micro Electro Mechanical System - інтегральні мікроелектромеханічні системи). Акселерометри iMEMS були першими компонентами в лінійці датчиків руху Motion Signal Processing™, у яких застосовується нова технологія, що дозволяє сполучати компактні, надійні датчики зі схемами обробки сигналів на одному кристалі. Сьогодні компанія «Analog Devices» пропонує найширший вибір акселерометрів, призначених для самих різних систем, що характеризуються високою точністю, малим енергоспоживанням і малими розмірами [13].

Акселерометри ADXL є основним сімейством акселерометрів «Analog Devices», у них використовується поверхнева мікромеханічна технологія iMEMS. Технологія iMEMS дозволяє одержати високу надійність, якість і низьку вартість. Акселерометри випускаються для малих і для великих значень прискорення і застосовуються для вимірювання положення, руху, нахилу, ударів і вібрації в різних системах.

Датчики серії ADXL оптимальні для застосування при великих обсягах продукції, що випускається, там де ціна акселерометра надзвичайно важлива, тоді як датчики ADIS забезпечують розширені можливості і додаткові функції там, де потрібна гнучкість застосування. Акселерометри серії ADIS випускаються в різних корпусах, у цих приладах об'єднані власне датчики типу ADXL і схеми обробки сигналів, у яких утілений багаторічний досвід фірми «Analog Devices» в області аналогових, цифрових мікросхем і мікросхем зі змішаними сигналами.

На рис. 1, 2 наведені: схема акселерометра ADXL330 – мало енергоспоживання, з трьома вимірювальними осями, $\pm 3g$, та акселерометр ADXL50, в якому електроніка займає більшість простору трьохміліметрової двомікросхемної області.

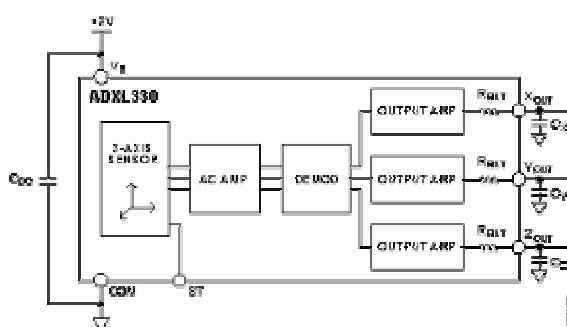


Рис. 1. Схема акселерометра ADXL330

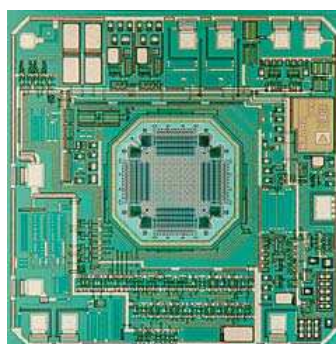


Рис. 2. Акселерометр ADXL 50 компанії «Analog Devices»

Компанія «Sandia National Laboratories» розробила зразок датчика, що може виявляти переміщення в менш ніж 1 нм (рис. 3). Основна частина приладу являє собою ґрати, виготовлені з двох гребінок, що перекриваються, (поперечний

розмір 50 мкм): одна нерухома, інша прикріплена до пружини. Відстань між зубцями гребінки складає від 600 до 900 нм, що порівняно з довжиною хвилі видимого світла. Навіть при незначному переміщенні приладу рухлива гребінка здійснює коливання, розширюючи або звужуючи ґрати, утворені зубцями. Зміна зазорів решітки впливає на її оптичні властивості, і лазерний промінь, відбиваючись від зубців, що перекриваються, буде помітно яскравим або тьмяним. Вважається можливим використовувати такий детектор як основу навігаційного приладу, що зможе працювати незалежно від супутникової мережі глобальної системи позиціонування.

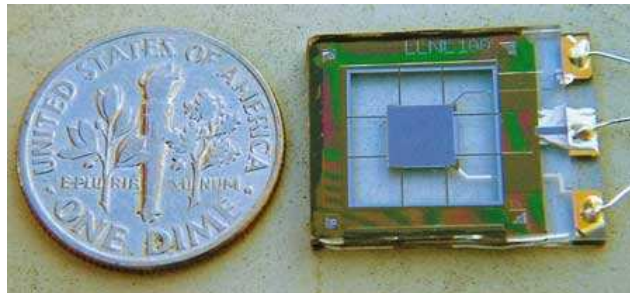


Рис. 3. Датчик MEMC

Традиційно системи позиціонування на базі руху страждають від нагромадження дрібних помилок. З часом ці помилки можуть призвести до показань, що відхиляється від дійсного положення на милі. Позиційне фіксування, характерне для приладу Sandia, забезпечує набагато більш повільну деградацію характеристик. Крім того, прилад може працювати під водою й у тунелі, куди GPS-сигнал не проходить.

Інтерес представляє також розробка фірмою «HDK America Inc.» самого малогабаритного п'єзореzystивного трьохосового акселерометра НААМ-32В з розмірами 3x3x1мм. Прилад виготовлений на кремнієвій підкладці з використанням MEMC технології і має вихідну чутливість 400 мВ/г (напруга живлення 3В). Прилад може встановлювати дрібні значення динамічних прискорень по осях X, Y і Z, дані вихідного нахилу і гравітаційного прискорення одночасно. Прилад розрахований на номінальне прискорення $\pm 2g$ і ефективну по потужності конструкцію, споживаючи струм 0,35 мА і 1 мкА в режимі очікування. Напруга розбалансу складає $1,5V \pm 0,075V$, чутливість дорівнює 20 мВ/г з лінійністю $\pm 3\%$ FS. Діапазон робочих температур від 0 до 75°C. Ударна стійкість оцінюється при 4000g.

Ємнісні двохосові MEMC акселерометри серії MMA62xx з діапазоном вимірювання прискорень від 1,5 до 10g ($\pm 1,5g$) розробляються фірмою «Freescale Semiconductor Inc.». MEMC акселерометр, виконаний на кристалі, містить схему для обробки сигналу, однополюсний фільтр нижніх частот і схему компенсації температури. Зсув Zero-g у повному діапазоні і частота відсічення фільтра встановлюються на заводі, і зовнішні прилади не потрібні. На кристалі також реалізовані можливості повного самотестування. Фірма виготовляє сімейство

датчиків, використовуваних у приладах, що зчитують нахил, рух, місце розташування, удар і вібрації в двох напрямках (осі X і Y). Датчики працюють у діапазоні частот між 50 і 900 Гц, забезпечуючи можливість конструкторам обирати відповідні прилади під свої вимоги. Датчики працюють на напрузі від 2,7 В до 3,6 В и розсіюють максимальний струм від 1,5 мА до 3 мА залежно від обраної моделі. Діапазон номінальних значень шуму складає від 1,3 до 3,5 мВ_{RMS} у залежності від моделі датчика.

ММА6260Q, 6261Q, 6262Q і 6263Q мають чутливість 800-мВ/г при 50, 300, 150 і 900 Гц, відповідно. Прилади 6231Q і 6233Q мають чутливість 120-мВ/г при 300 і 900 Гц, відповідно. Використовується 16-вивідний квадратний, плоский, безвивідний корпус з розмірами 6х6х1,98мм.

Інерційний датчик на кремнієвій основі КХ110 компанії «Kionix» (ІТНАСА, Нью-Йорк) має саму високу чутливість на даний час. Акселерометр реєструє статичне і динамічне прискорення, кути нахилу, і вібрацію, і призначений для використання в системах, керуючих рухом, узагалі, і в автомобільній електроніці - особливо. Датчики мають вбудовану систему самоперевірки й, обумовлену користувачем, налаштування ширини смуги частот. Вони вимагають електроживлення 5В, забезпечують аналоговий вихід сигналу, пропорційного прискоренню, і зібрані в компактний пакет SOI з 16 пінами. При виробництві КХ110 використовується процес плазменної мікромашинної обробки.

З використанням мікрOMEХАнічної обробки [14] англійська фірма «Jewell Instruments LLC» розробила універсальний акселерометр LCM-100. Прилад працює в діапазоні температур від - 45°С до + 85°С, витримує ударні навантаження до 500g. Власна частота дорівнює 100 кГц, вхідна неузгодженість дорівнює 3° максимум, дозвіл і граничне значення 0,005g. Прилад використовується для тестування характеристик автомобілів, для контролю ліфтів, для сейсмічного моніторингу, для контролю верстатів і при льотних іспитах.

Широкий спектр п'єзоелектричних акселерометрів випускається фірмою «Endevco Corp.» (США). Акселерометр 525 має динамічні діапазони: ± 50g, ±100g, ±500g, тоді як акселерометр 528 має динамічні діапазони: ±5g, ±25g, ±50g. Прилади розміщуються в герметичному корпусі і мають амплітудні характеристики 0,5 Гц до 12 кГц і 0,5 Гц до 10 кГц, відповідно. Інші характеристики: діапазон робочих температур -54°С до 125°С, межа пікової синусоїдальної вібрації ±800 g, ударна межа 10 кГ.

Висновки

Проведений аналіз стану та розвитку мікроелектромеханічних систем показує, що МЕМС прилади, пристрої та системи активно розвиваються і знаходять широке застосування практично у всіх галузях науки і техніки. Проектуванню, розробці та удосконаленню цих систем приділяють велику увагу світові лідери МСТ. Проте, незважаючи на це, сукупність конструктивно-технологічних, схемотехнічних та функціональних особливостей дозволяють стверджувати, що одним з головних напрямків подальшого розвитку цієї галузі є підвищення які-

сних характеристик на основі нових ефектів, які побічно зв'язані з зменшенням розмірів, та створення нових «специфічних» МЕМС приладів та систем.

Література

1. What is MEMS Technology. - <http://www.memsnet.org>.
2. MicroElectroMechanicalSystems(MEMS). - <http://www.csa.com/discoveryguides/mems>.
3. Hocker G. B. MEMS-Based Sensors. - <http://www.wtec.org>
4. MEMS technologies and applications. SPIE PRESS. 2000. Vol. PM85. 516 p.
5. Abaqus ver. 5.7. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, <http://www.hks.com>.
6. MEMCAD ver. 4.5. Microcosm Technologies, Inc., Research Triangle, NC, <http://www.memcad.com>.
7. IntelliSuite, IntelliSense Corp. Wilmington, MA, <http://www.intellisense.com>.
8. Funk J.M., Korvink J.G., Buhler J., Bachtold M., Bakes H. SOLIDIS: A tool for microactuator simulation in 3-D // J. Microelectromechanical Systems. Mar. 1997. Vol. 6, № 1. P. 70-82.
9. ANSYS/Multiphysics ver. 5.5. Ansys, Inc., Canonsburg, PA, <http://www.ansys.com>.
10. Star-HSPICE, Avant! Corp., Fremont, CA, <http://www.avanticorp.com>.
11. Simulink ver. 3.0, The Mathworks, Inc., Natick, MA, <http://www.mathworks.com>.
12. SABER. Analog Inc., Beaverton, Oregon, <http://www.analogy.com>.
13. ADXL150/250, Signal Chip MEMS Accelerometer with Signal Conditioning Datasheets, Analog Devices, Cambridge, MA. - <http://www.analog.com>.
14. General-purpose accelerometer from Jewell. - www.sensorsmag.com/express/announce.cgi.

Казаченко Г.А., Гераїмчук М.Д. **Развитие и состояние микроэлектромеханических систем**

В работе проведен анализ состояния и развития микроэлектромеханических систем (МЕМС), рассмотрены технологические процессы их изготовления и программное обеспечение компьютерного модулирования МЕМС. Рассмотрены существующие микро устройства, приборы и системы измерения параметров движения, в частности, ускорения, а также приборы ориентации и навигации.

Kazachenko G.A., Geraimchuk M.D. **Condition and development of microelectromechanical systems**

In this paper the analysis of a condition and development of microelectromechanical systems (MEMS) is lead, technological processes of their manufacturing and the software of computer modulation MEMS are considered. Existing micro devices and systems of measurement of parameters of movement, in particular, acceleration, and also devices of orientation and navigation are considered.

*Надійшла до редакції
27 листопада 2007 року*