

УДК 681.3

Д.В. Трушаков, доц., канд. техн. наук, Д. Ю. Мошна, магістр  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Створення конфігурацій обчислювальних комплексів з підвищеною надійністю

В статті описані дослідження надійності обчислювальної системи – як персонального комп'ютера, так і специфічної обчислювальної машини, на які покладають рішення задач різної складності і вимагають різного ступеню надійності, наприклад, для використання при конструюванні та виробництві у машинобудуванні. Доведено необхідність вибору структури обчислювального комплексу для відповідної задачі окремо, що дає можливість використовувати всі можливості системи замість постійного вдосконалення її заміною блоків на більш нові, що підвищує собівартість такої системи в той час, коли не використовуються всі наявні ресурси. Таке дослідження доводить відсутність необхідності побудови, наприклад, багатопроцесорної системи для ординарних цілей, що дозволяє скоротити об'єм витрат на її побудову.

**обчислювальний комплекс, відмовостійкість, стійкість до відмов, апаратне резервування, дублювання, оцінка надійності, відмовостійка обчислювальна система, надійність обчислювальної системи**

**Постановка проблеми.** Науково-технічний прогрес у сільському господарстві щільно пов'язаний з удосконаленням автоматизації виробництва. Якісне створення, виготовлення та ремонт сільськогосподарської техніки мають велике значення для розвитку агропромислового комплексу України. Таким чином, розвиток промисловості неразривно пов'язаний зі створенням засобів автоматизації управлінського та інженерного труда, в тому числі розвитку обчислювальної техніки. Персональні комп'ютери (ПК) та обчислювальні комплекси (ОК) широко використовуються в різних галузях народного господарства, на їх основі створюються системи розподіленої обробки даних, інтегровані автоматизовані системи управління (АСУ), мікромашинні обчислювальні комплекси. При цьому міні та мікроЕОМ одного типу, але різної конфігурації можна використовувати на різних ступенях управління виробництвом, що спрощує створення елементної бази, програмного забезпечення, носіїв інформації і інтерфейсу. При цьому особливо увага приділяється надійності багатомашинних обчислювальних комплексів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Побудова багатомашинних обчислювальних комплексів з підвищеною надійністю на основі базових обчислювальних комплексів може забезпечуватись декількома способами: організацією взаємозв'язку із застосуванням загальних зовнішніх запам'ятовуючих пристроїв (ЗЗП); організацією міжпроцесорного обміну; організацією взаємозв'язку з використанням багатовходової пам'яті. Для реалізації цих способів повинні бути зняті існуючі обмеження просторового розташування та навантажувальної можливості, забезпечена фізична комутація окремих частин ОК, а також значна увага повинна приділятися відмовостійкості обчислювальних комплексів. Відмовостійкість – властивість обчислювальної системи (ОС), яка забезпечує їй можливість продовження дій, заданих програмою, після появи несправностей.

Дана проблема частково висвітлена в джерелах [1, 3, 5]. Але на практиці побудувати відмовостійкий обчислювальний комплекс дуже складно, так як це потребує надмірного апаратного і програмного забезпечення.

**Задача досліджень.** Метою дослідження в даній статті є порівняльне оцінювання можливостей функціонування різних за конфігурацією обчислювальних комплексів з підвищеною надійністю.

**Виклад основного матеріалу.** Концепції паралельності і відмовостійкості обчислювальних систем однозначно пов'язані між собою, оскільки в обох випадках потребуються додаткові функціональні компоненти. Тому в паралельних обчислювальних системах досягається як найвища продуктивність, так і в багатьох випадках дуже висока надійність. Структура багатопроцесорних і багатомашинних систем таких як, наприклад, DEC1055 та DEC1077, пристосована для автоматичної реконфігурації і забезпечує можливість продовження дій, заданих програмою, після виникнення несправностей [2]. В паралельних обчислювальних системах іншого типу (наприклад в матричних) можливість продовження дій після виникнення несправностей у процесорних елементах забезпечується шляхом відключення цих елементів.

Методика реалізації стійкості до фізичних відмов передбачає визначення цілей надійності, вибір алгоритмів виявлення несправностей і відновлення роботи обчислювальних систем, оцінку відмовостійкості та інтерактивну довідку розробки системи. За умови реалізації автоматичної стійкості до відмов, алгоритм відновлення (як і алгоритм виявлення несправностей) повинен виконуватись без участі людини, тобто він повинен забезпечувати поновлення нормальної роботи обчислювальної системи тільки автоматично. При цьому ремонт після відновлення може як передбачатись, так і не передбачатись. Якщо ремонт не проводиться (наприклад, у випадку орбітального супутника), то із вичерпанням ресурсів надлишковості обчислювальна система завжди відмовляє. У ремонтпридатних обчислювальних системах можна передбачити ручний ремонт після автоматичного відновлення їх нормальної роботи, до того ж проводити такий ремонт можна як одразу ж після завершення робіт алгоритму відновлення, так і за заздалегідь складеним графіком періодичного технічного обслуговування з врахуванням ресурсів надлишковості. Типовим прикладом ремонтпридатних обчислювальних систем є відмовостійкі телефонні системи електронної комутації ESS (Electronic Switching System) [2].

Алгоритми відновлення можуть бути реалізовані апаратно з програмою підтримки або виключно програмними засобами. У першому випадку відновлення має назву апаратно-керованого. Воно реалізоване, наприклад, у системі IPL STAR, у створеному дослідному зразку відмовостійкої системи FISC. У другому випадку відновлення називається програмно-керованим. Воно реалізовано, наприклад, у системі PLURIBS, де достатньо ефективно використовуються засоби апаратного резервування на різних рівнях (від елемента до вузла або блока EOM) [2].

В залежності від характеру відмови алгоритму відновлення обчислювальної системи виконується або її повне відновлення з поверненням до вихідних умов роботи і з заміною несправного модуля на запасний, або повернення у справний стан при зниженні обчислювальних можливостей, або (як окремий випадок) безпечна зупинка, якщо продуктивність, що лишилася, є нижчою за допустимий поріг (інформація у пам'яті при цьому залишається без ушкоджень).

Одним з випадків апаратно-керованого відновлення є маскуванню несправностей, коли в статично надлишковій апаратурі шляхом, наприклад, потрійного модульного резервування ефект несправності залишається в рамках відповідного модуля і лишається невидимим для програмного забезпечення (ПЗ). При маскуванні можуть дублюватися модулі найрізноманітнішого рівня – від апаратних елементів до

функціональних пристроїв системи. В окремому випадку дублюємим модулем є сама обчислювальна машина (ОМ). Переваги маскування – простота і миттєвість дії, а головний недолік – необхідність в три-чотири і більше разів збільшувати об’єм устаткування для багатократного дублювання. Захист шляхом потрійного модульного резервування передбачений у центральному процесорі (ЦП) обчислювальної системи наведення ракети Saturn V [2]. При цьому основна ідея полягає у наступному. Припустимо, що розроблено ряд універсальних вузлів і блоків керуючого обчислювального комплексу. При цьому виникає задача на основі розроблених блоків створити різні конфігурації керуючих обчислювальних комплексів, які були б адекватні вирішувемим їми задачам (задача комплексування). При цьому керуючі обчислювальні комплекси з новими функціональними параметрами (надійністю, відмовостійкістю, відновлюваністю) можуть бути отримані шляхом самостійних розробок, що потребують незначних нових ресурсів та виробничих потужностей, або шляхом побудови нових конфігурацій із стандартного набору універсальних блоків. Отримані конфігурації можуть бути розташовані в ряд за зростанням їх складності із відповідним збільшенням їх характеристик (надійності, швидкодії, розмірів, системи живлення і т.п.). До того ж комплексування дозволяє провести порівняльну оцінку можливостей функціонування однопроцесорних електронних обчислювальних машин (ЕОМ), багатомашинних і багатопроцесорних систем, в тому числі оцінити їх надійність, оскільки оцінка надійності різноманітних за конфігурацією керуючих обчислювальних комплексів аналітичними методами неможлива.

Для порівняльної оцінки можливостей функціонування різних за конфігурацією обчислювальних комплексів розглянемо деяку стандартну однопроцесорну ЕОМ, що позначимо  $[p+m]$ , де  $p$  та  $m$  - її стандартні процесор та оперативна пам’ять відповідно, як показано на рисунку 1.

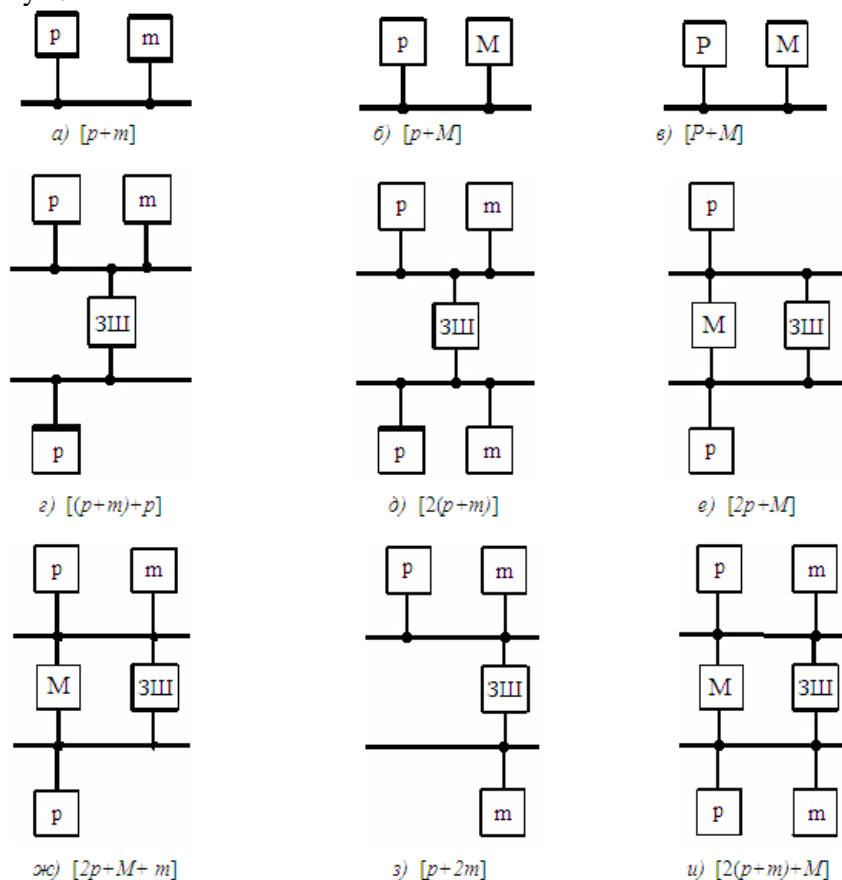


Рисунок 1 – Можливі варіанти побудови структури керуючих обчислювальних комплексів, отримані шляхом комплексування

Нехай тепер  $P$  - процесор з подвоєною продуктивністю в порівнянні з  $p$ , а  $M$  - оперативна пам'ять з подвоєною ємністю й пропускну здатністю каналів у порівнянні з  $m$ . Розглянемо також однопроцесорну ЕОМ зі стандартним процесором  $p$  і подвоєною оперативною пам'яттю  $M$  і таку ж ЕОМ, але із процесором подвоєної продуктивності  $P$  і подвоєною оперативною пам'яттю  $M$ , які позначимо  $[p+M]$  й  $[P+M]$  відповідно. Розглянемо ще сукупність двох стандартних ЕОМ, що позначимо  $[2(p+m)+M]$ , і двохпроцесорну систему, що складається із двох стандартних процесорів  $p$  і загальної для них оперативної пам'яті подвоєної ємності  $M$ , що позначимо  $[2p+M]$ . Процесор та оперативна пам'ять з'єднані магістраллю - загальною шиною (ЗШ). Перераховані структури, а також структури, отримані шляхом комбінації стандартних блоків, представлені на рисунку 1. При цьому структури, що представлені на рисунку 1 ( $a, б, в, д, e, u$ ) можна розглядати як базові, а структури що представлені на рисунку 1 ( $г, ж, з$ ) - як їхні окремі випадки, що отримані при відмові окремих блоків.

Результати порівняльної оцінки чотирьох системних структур наведені у таблиці 1. В ній використовуються наступні умовні позначення якості структур за вказаними у таблиці критеріями: + - звичайні можливості; ++ - покращені можливості +++ - найкращі можливості.

Таблиця 1 - Порівняльна оцінка системних структур [2]

Показник	Структура обчислювальних систем				
	$[2p+M]$	$[p+M]$	$[2(p+m)]$	$[P+M]$	$[2(p+m)+M]$
Продуктивність	++	+	++	+++	++
Захист (надійність зберігання найбільш важливих даних)	+	+	+++	+	+++
Частота перезапусків при виконанні завдань	+	+++	++		+++
Критична готовність	+++	+	++	+	+++
Виконання особливо трудомістких завдань і робота при пікових навантаженнях	+++	++	+	+++	+++

З таблиці випливає, що двохпроцесорна структура  $[2p+M]$  має деякі переваги у окремих областях, однак треба мати на увазі, що її продуктивність не досягає подвоєної продуктивності структури  $[p+M]$ , тобто продуктивності структури  $[P+M]$ . Слід відмітити, що двохпроцесорна структура із загальною пам'яттю  $[2p+M]$  рівноцінна іншим структурам або перевершує їх за показниками критичної готовності, виконання особливо трудомістких завдань і роботи в умовах короткочасних перевантажень, тобто при пікових навантаженнях. Недолік цієї структури за показником частоти перезапусків є наслідком підвищеної складності її операційної системи і інших керуючих механізмів, що може призводити до необхідності більш частих перезапусків. Нарешті, менша надійність зберігання найбільш важливих даних у такій структурі в порівнянні з парою продубльованих ЕОМ визначається власне дублюванням. Відповідні оцінки для структури  $[2(p+m)+M]$  отримані з оцінок більш простих структур.

Очевидно, що ряд структур, які представлені на рисунку 1, не вичерпують типи обчислювальних комплексів, які можуть бути отримані шляхом комплексування, так як задачу комплексування можна розглядати ширше. При цьому запропоновані нові структури, можливо, будуть вимагати нових програмних засобів для їх функціонування (тест-моніторної системи, програм реконфігурації і відновлення і т.п.), але при цьому акцент буде зроблений на побудову нової структури із стандартних модулів.

Результати розрахунків показників надійності ПК за допомогою лямбда-методу (на основі експоненціального розподілення) та ймовірно-фізичного методу при заданому напрацюванні до відмови  $t_{зад}=1000$  годин приведені у таблиці 2.

Таблиця 2 - Результати розрахунків показників надійності ПК

Показник надійності	Лямбда-метод	Ймовірно-фізичний метод
Середнє напрацювання до відмови $T_{ср}$ , годин	2711	8189
Гамма-відсоткове напрацювання $T_{\gamma}$ , годин	286	1953
Ймовірність безвідмовної роботи $P(t_{зад})$	0,7	0,99

Графік ймовірності безвідмовної роботи ПК на основі експоненціального розподілення представлений на рисунку 2.

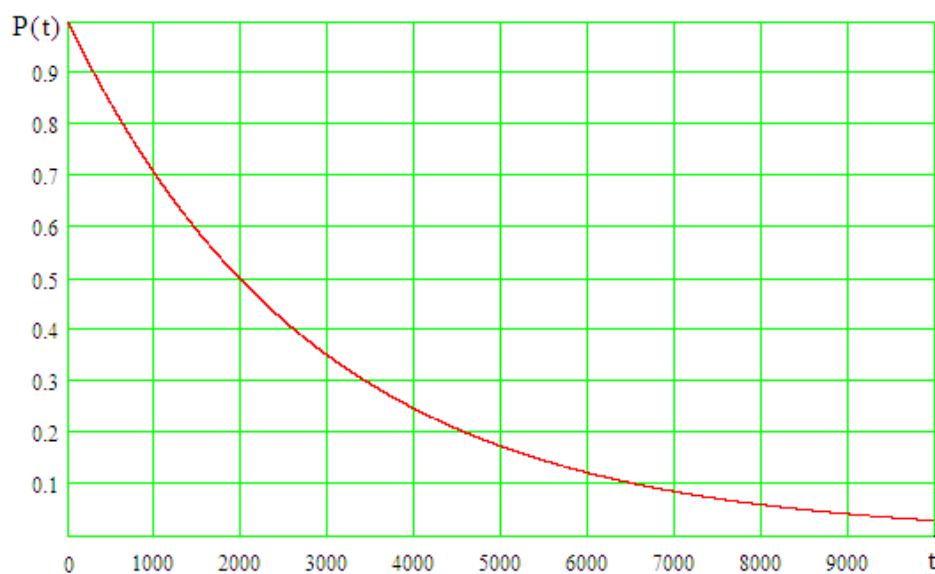
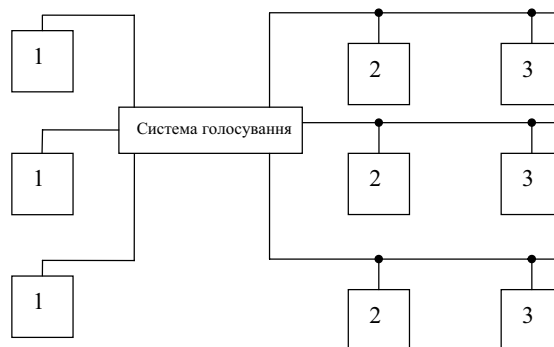


Рисунок 2 - Ймовірність безвідмовної роботи ПК на основі експоненціального розподілення

Якщо, наприклад, поставлена задача побудови обчислювальної системи із збереженням її працездатності при відмовах завдяки реалізації принципу незалежності програмного забезпечення (з точки зору користувача) від механізмів відмовостійкості, а також застосуванням серійних компонентів і здійсненням динамічної зміни співвідношення між продуктивністю і надійністю системи. Таке завдання розв'язується шляхом введення в обчислювальну систему надмірності на рівні процесорів і модулів пам'яті з мажоритарним голосуванням на рівні шин, як показано на рисунку 3. Система складається з трьох модулів пам'яті, з'єднаних між собою за допомогою шин через схему голосування. Голосування відбувається паралельно за різними розрядами і відбувається при кожному зверненні процесорів до шини для передачі або прийому інформації, тобто тільки в тому випадку, коли через схему голосування проходить

інформація. Будь-які розузгодження сигналів між процесорами не потрапляють у пам'ять і навпаки, тобто розузгодження виявляється і коректується до того, як воно встигне поширитися у обчислювальній системі.



1 – процесор; 2 – оперативна пам'ять; 3 – дискова пам'ять

Рисунок 3 – Структурна схема обчислювальної системи з голосуванням

Окрім стандартних модулів  $p$  і  $m$  (процесори і модулі пам'яті), в систему вводиться орган голосування, який може бути реалізований на мажоритарних елементах, що випускаються серійно. Побудову обчислювальних комплексів за даною схемою із використанням трьохкратної надлишковості доцільно використовувати при розв'язанні задач, які потребують дуже великої функціональної надійності за невеликий проміжок часу (наприклад, ймовірності безвідмовної роботи 0,9999 за 1 годину) [2].

В системі передбачається також режим незалежної роботи процесора, при переході до якого забезпечується підвищення продуктивності за рахунок зниження відмовостійкості (робота без голосування). В такому режимі продуктивність обчислювальної системи співпадає з продуктивністю процесора  $p$ , а при переході до режиму з голосуванням продуктивність знижується через процес голосування приблизно на 14%. Аналогом даної обчислювальної системи є розроблена в університеті Карнегі–Мелона (США) відмовостійка система C.Vmp [2]. В якості процесора в ній використаний мікропроцесор типу ISI-11. За оцінками, середнє напрацювання на відмову системи C.Vmp повинно складати не менше 1000 годин.

Наступною можливістю побудови відмовостійкої обчислювальної системи шляхом комплексування є створення надмірної конфігурації, у якій виявлення несправностей та відновлення системи проходить під контролем програмного забезпечення. Приклад такої конфігурації показаний на рисунку 4, де зображена структура зв'язків між функціональними блоками системи:  $p$  – процесорами,  $m$  – блоками пам'яті,  $BB$  – пристроями вводу-виводу.

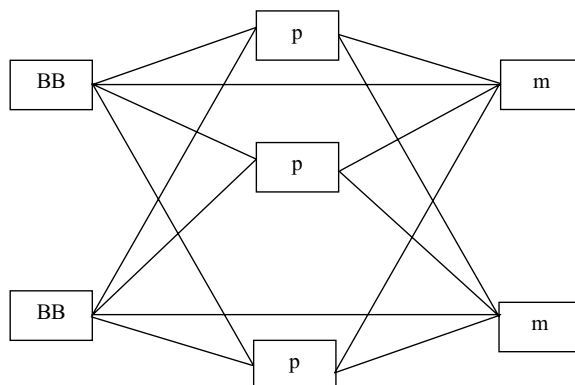


Рисунок 4 – Структура зв'язків між функціональними блоками обчислювальної системи

Окрім комплексування, система даного типу повинна мати спеціальну операційну систему для реалізації властивості відмовостійкості при наявності резервних блоків (періодично перевіряються тестами модулі обчислювальної системи, відключаються несправні модулі, перевіряється правильність роботи програмного забезпечення, проводяться повторні обчислення і т.п.).

Аналогічна конфігурація реалізована в системі PLURIBUS, яка являє собою модульну симетричну багатопроцесорну обчислювальну систему. Вона призначена для цілодобової роботи, в тому числі в необслуговуваних пунктах. В якості процесорних модулів використані міні-ЕОМ фірми Lockneed (США), архітектурно подібні міні-ЕОМ сімейства PDP-11 фірми DEC (США).

У сучасних однопроцесорних ЕОМ комплексування може передбачатися на чотирьох рівнях: на рівні процесорів для синхронізації та управління; на рівні каналів вводу-виводу за допомогою адаптерів; на рівні оперативної пам'яті (за рахунок можливостей багатовходової пам'яті); на рівні зовнішньої пам'яті. При цьому можуть допускатися будь-яка або декотрі комбінації рівнів комплексування. Така концепція реалізується в тих чи інших моделях ЕОМ сімейств ЕС ЕОМ, ІВМ-360 та ІВМ-370. При комплексуванні на рівні оперативної пам'яті основною є двохпроцесорна структура, хоча можливі структури і з більшим числом процесорів.

Взагалі комплексування багатомашинних обчислювальних комплексів на основі базових обчислювальних комплексів може забезпечуватись декількома способами: організацією взаємозв'язку із застосуванням загальних зовнішніх запам'ятовуючих пристроїв; організацією міжпроцесорного обміну; організацією взаємозв'язку з використанням багатовходової пам'яті. Для реалізації цих способів повинні бути зняті існуючі обмеження просторового розташування та навантажувальної можливості, а також забезпечена фізична комутація окремих частин обчислювальних комплексів.

В останні роки велика увага також приділена розробці та практичному використанню волоконно-оптичних мереж зв'язку. Це обумовлено рядом суттєвих переваг у порівнянні з традиційними мережами зв'язку, головними з яких є: широкополосність (1 ГГц і більше); скритність (відсутність опромінювання при непошкоджених світловодах, можливість швидкої і точної локалізації місця пошкодження); перешкодозахищеність (виключення електромагнітних перешкод і наводок з-за електричної ізоляції); гнучкість (мінімальний радіус вигину складає 3 см).

#### **Висновки:**

1. Шляхом комплексування можна створити достатньо багато різних варіантів побудови структури керуючих обчислювальних комплексів.

2. Запропоновані нові структури, можливо, будуть вимагати нових програмних засобів для їх функціонування (тест-моніторної системи, програм реконфігурації і відновлення і т.п.), але при цьому акцент буде зроблений на побудову нової структури із стандартних модулів.

3. Підвищення надійності персонального комп'ютера можливе лише за рахунок підвищення надійності елементів та зміні структурної схеми.

4. Практичні результати, що отримані в даній роботі, можуть бути використані при розробці, як персональних комп'ютерів, так і специфічних обчислювальних комплексів, на які покладають рішення задач різної складності і вимагають різного ступеню надійності.

## Список літератури

1. Трушаков Д.В., Николаєва Л.А., Коренецька Н.Б., Мошна Д.Ю. Дослідження надійності інформаційної системи. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2010. – Випуск 23. – С.274-280.
2. Кривоногов Ю.А., Морозов А.А. Мини- и микроЭВМ. Номенклатура и технико-эксплуатационные характеристики: Справ. / Под ред. В.В. Свиридова. – К.: Вища шк., 1990. – 287 с.
3. Кривоногов Ю.А., Скрипник П.М., Михайлецкий З.М. Микромашинные комплексы коллективного пользования. – К.: Техника, 1986. – 186 с.
4. Комплексы технических средств: Каталог (средства вычислительной техники). – М.: Информприбор, 1988. – 106 с.
5. Вейцман П.Н. Распределенные системы мини- и микро-ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1983. – 233 с.
6. Замерин А.П., Мячев А.А., Селиванов Ю.П. Справочник. Вычислительные машины, системы, комплексы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.

*Д. Трушаков, Д. Мошна*

### **Создание конфигураций вычислительных комплексов с повышенной надежностью**

В статье описаны исследования надежности вычислительной системы – как персонального компьютера, так и специфической вычислительной машины, на которые возлагается решение задач различной сложности и от которых требуется разная степень надёжности, например, для использования при конструировании и производстве в машиностроении. Доказана необходимость выбора структуры вычислительного комплекса для соответствующей задачи отдельно, что позволяет использовать все возможности системы вместо постоянного усовершенствования её заменой блоков на более новые, что увеличивает себестоимость такой системы, в то время как не используются все наявные ресурсы. Такое исследование доказывает отсутствие необходимости построения, например, многопроцессорной системы для ординарных целей, что позволяет сократить объём затрат на её построение.

*D. Trushakov, D. Moshna*

### **Creation of the configuration computing system with higher reliability**

In the article researching the reliability of the computer system – personal computer or specific computer system for industry in the machine building – which is charged for different applications and from which needed different reliability. Proved the need of computer system structure choosing separately depend on it's applications, what allow use all possibilities of the system instead of constant modules upgrade, what mount of course, the prime cost of such system while not all existing resources are applied. Such research proves absence of need building, for example, a multi-processor system for ordinary use, what allows to reduce costs value for it's building.

Одержано 07.02.11