

FRI-2G.303-1-CCT1-07

TEACHING OPERATING SYSTEMS: MEMORY MANAGEMENT⁷

Tzanko Golemanov, PhD

Department of Computer Systems and Technologies,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 681
E-mail: TGolemanov@uni-ruse.bg

Emilia Golemanova, PhD

Department of Computer Systems and Technologies,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 681
E-mail: EGolemanova@uni-ruse.bg

Abstract: *Operating Systems (OS) is probably the most complex software ever created by humans and Operating Systems is an essential component in Computer Science (CS) curricula and related majors. We, as CS educators, aim for every student to get an inside view of the structure and functioning of an operating system, and using appropriate teaching tools is an essential point in achieving this goal. In this paper, we would like to share our experience in teaching OS Memory Management using the TOST (Teaching in Operating System Tool) environment. TOST enables students to run several processes and to observe the allocation of memory blocks, both in contiguous and non-contiguous memory allocation (virtual memory paging). Students can alternate several contiguous allocation strategies or several page replacement strategies. It is possible to trace the addressing in virtual memory pages and the conversion of virtual addresses to real ones. The dynamic visualization of the memory allocation map makes it easy for the instructor to clarify the principles of locality - Temporal locality and Spatial locality. The ability to experiment with both theoretical concepts and their application in the same environment allow students to gain a better apprehending of the algorithms behind the design, construction, and insights of operating systems.*

Keywords: *Operating Systems, Teaching Tools, Memory Management, Virtual Memory.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Оперативната памет (ОП) е втория по важност ресурс (след процесорното време) на всяка изчислителна система и от правилното ѝ разпределяне и управление (**Memory Management**) до голяма степен зависи ефективността и производителността на системата. За коректното ѝ използване операционната система използва широк набор от организации, стратегии и алгоритми, изучаването на които допринася сериозно за професионалното развитие на студентите в „Компютърни системи и технологии“. Изучаваният материал позволява на студентите, както да получат един поглед отвътре към функционирането на **Операционната система (ОС)**, така и възможност разгледаните алгоритми, приложени при **Управлението на оперативната памет (УОП)**, да бъдат използвани в бъдещи софтуерни разработки с конкретно предназначение.

Виртуална памет (ВП) както е известно, представлява Прекъснатото разпределение на оперативната памет (**Non-Contiguous memory allocation**). След десетилетия на тотално господство на Непрекъснатото разпределение (**Contiguous memory allocation, Реална организация на памет**), за относително кратко време ВП (Wilson, P.R., Johnstone, M.S., Neely, M., Boles, 1995) се налага почти навсякъде в компютърните системи, като към момента е почти невъзможно да се намери дори мобилен телефон, който да не използва ВП. Затова детайлното познаване на принципите, върху които се базира, и механизмите на функционирането ѝ са от базово значение за компютърните специалисти (Tanenbaum and Bos, 2016). За съжаление ВП е една от концепциите в областта на операционните системи (ОС), които често са трудни за усвояване от съвременните студенти. Затова тук бихме искали да споделим нашия опит

⁷ Докладът е представен на сесия на секция 3.2 на 28 октомври 2022 с оригинално заглавие на български език: ОБУЧЕНИЕ ПО ОПЕРАЦИОННИ СИСТЕМИ: УПРАВЛЕНИЕ НА ПАМЕТА

(проблеми, подходи и резултати) в преподаването на този материал в Русенския университет, като акцентът е в работата по време на практическите упражнения.

Структурата на доклада продължава с: Изложение, в което е направен анализ на проблемите при преподаване на концепциите свързани с ВП: основни причини и следствия. След това е представена Технологията на процеса на обучение с използване на интегрираната среда TOST. Дефинирани са основните стъпки, през които преминават студентите по време на упражненията. Описано е използването на TOST при преподаване Непрекъснатото разпределение на паметта: предимства, проблеми и частични решения, след което се преминава към демонстрации как ВП разрешава дефинираните проблеми. Представени са визуализацията на заемането на странични кадри от разработените от студентите процеси, преобразуването на виртуални адреси в реални и функционирането на различни стратегии за замяна на страници (Random, FIFO, LFU, LRU, NRU). В Заключението е представена оценката на възможностите на обучаващия софтуер както и някои изводи за преподаването на УОП в бакалавърския курс на Русенския университет.

ВИРТУАЛНА ПАМЕТ: Проблеми

Концепциите свързани с ВП, наред с тези касаещи *Deadlock* и *Concurrent Processes Interaction* са едни от най-проблемните в преподаването на ОС. Парадоксално е естеството на затрудненията, които студентите имат при срещата им с темата ВП. Тези затруднения могат формално да се причислят към две групи:

- **Обективни:** Основават на отдалечеността ни от периода на активното използване на Непрекъснатото разпределение на паметта (*Contiguous Memory Allocation*). В резултат, днешните студенти не могат да си представят проблемите на програмистите отпреди 30-40 години, опитващи се да разработят сложни софтуерни проекти в условията на силно лимитиран обем ОП (напр. 48 KB на Apple II). Незнанието и/или неразбирането на проблемите на Непрекъснатото разпределение не им позволява да си представят и функционирането на ВП и как тя се справя с тези проблеми.
- **Субективни:** Част от студентите (тези с известен опит в програмирането) идват все пак с изградена предварителна представа за ВП – защо е необходима, какво представлява и как функционира. За съжаление, въпреки изобилието на подробната информация по тематиката (презентации, цветни схеми, видео материали), в преобладаващата част тази предварителна представа е изключително объркана и погрешна. Което пък създава допълнителни проблеми на преподавателя в стремежа си първо да разясни къде, как и защо тези погрешни представи се разминават с реалната ситуация при ВП.

Наличието на проблеми от такъв смесен характер налага технологията на обучението по ВП да съдържа точно определена последователност на поднасяне на учебния материал, така че студентите сами да стигнат до представа за проблемите и подходите за разрешаването им.

ВИРТУАЛНА ПАМЕТ: Технология на учебния процес и учебен софтуер

Лекторът запознава студентите с теоретичните аспекти на ВП, обяснява как функционира и представя някои класически организации, коментирани в литературата (Deitel, Deitel and Choffnes, 2004), (Silberschatz, Galvin and Gagne, 2013). За да се справят успешно с тази част на учебния материал, студентите трябва да разгледат темите по-отблизо и да експериментират с проблемите и подходите за разрешаване им.

Следователно основните етапи в преподаването на ВП по време на практическите занятия включват:

- ✓ **Илюстриране на теоретичните принципи** чрез визуализация на съдържанието на основни системни таблици на ОС и заемането на оперативната памет при:
 - **Непрекъснато разпределение на паметта (*Contiguous Allocation*):**

- Предимства
- Проблеми и подходи за частично разрешаване
- **Прекъснатото** разпределение на оперативната памет (*Non-Contiguous Allocation*):
 - Елиминиране на проблемите на Непрекъснатото разпределение
 - Преобразуване на виртуални адреси в реални
 - Стратегии за замяна на страници (*Page Replacement*), явленията «*Пространствена локалност*» и «*Времева локалност*» и приложението им
- ✓ **Самостоятелно проектиране и разработване** на специфични алгоритми, свързани с работата на модула за управление на паметта (*Memory Management Unit, MMU*)

Особено важно в тази последователност от дейности е използването на подходящ учебен софтуер, който:

- да илюстрира достатъчно ясно концепциите на ВП, обсъдени в лекциите;
- да помогне на студентите при разработката на софтуерните им проекти.

В същото време, според нас, използваният учебен инструмент трябва да отговаря на следните основни изисквания:

- да работи на достъпна хардуерна и софтуерна платформа;
- да поддържа на мултипрограмиране и паралелни процеси;
- да е с познат и незатрудняващ интерфейс;
- да поддържа познати езици за програмиране с възможност за паралелна обработка на информацията.

Интегрираната среда **TOST** (Teaching in Operating Systems Tool) е разработена точно с тази идея. Представява виртуална машина (Golemanov and Golemanova, 2006), позволяваща на студентите да разработват и изпълняват паралелни процеси, като в същото време могат да променят основните настройки на операционната система (стратегия за планиране на процесорното време, размер на кванта в режим на времеделение, стратегия за управление на паметта, стратегия за управление на външната памет и т.н.), както и да наблюдават основните системни таблици (Процеси, Блокирани, Готови, Семафори и др.).

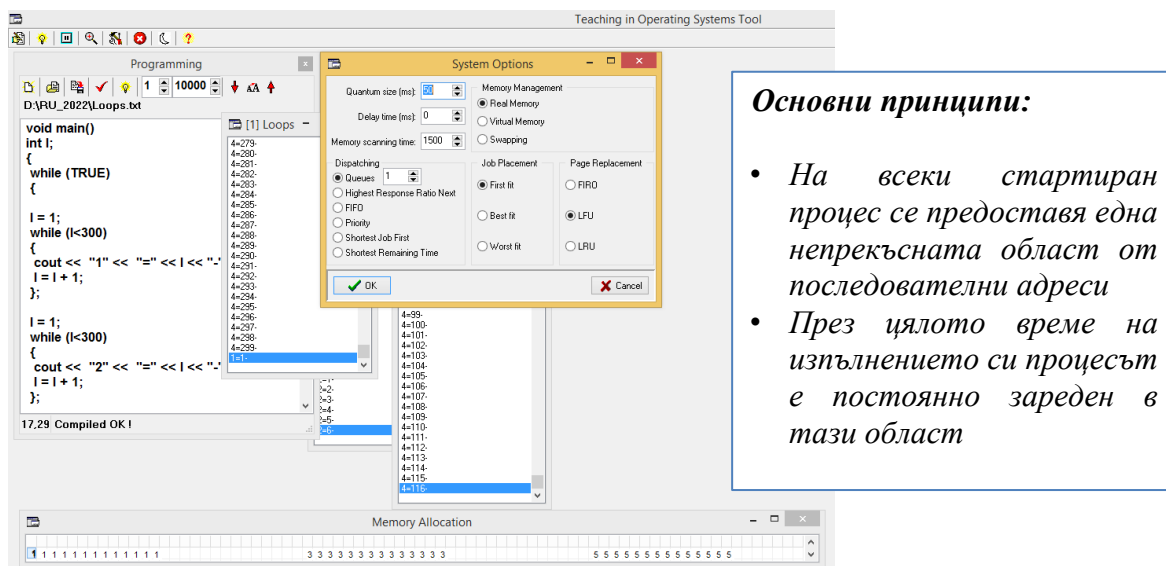
Разглежданата интегрирана среда включва:

- многозадачна и многопрозоречна операционна система;
- редактори и компилатори за два прости езика за програмиране;
- емулатор на виртуален процесор.

Текущата версия на TOST (2022) е разработена посредством на Embarcadero® Delphi в средата на Embarcadero RAD Studio 10.3.3 Rio. Изпълнимият файл е много малък по размер (по-малко от 1 MB), няма инсталационна процедура и може да се стартира във всяка MS Windows среда. TOST е лесна за усвояване и използване и позволява на студентите да се започнат пълноценна работа с нея за кратко време (около час).

НЕПРЕКЪСНАТО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ: Предимства, проблеми и решения

Първият етап в преподаването на УОП по време на практическите занятия включва запознаване с основните концепции на Непрекъснатото разпределение на паметта, като целта е да се акцентира на недостатъците му и необходимостта да бъде заменено с нов вид организация. На Фиг.1 е показана работата на студентите в TOST, където при настройки в *System Options: Memory Management/Real Memory* са стартирани три паралелни процеса. В отделен прозорец е визуализирана и карта на оперативната памет (*Memory Allocation*), показваща в реално време областите в които са заредени процесите.



Фиг. 1. Изпълнение на паралелни процеси в TOST при Непрекъснато разпределение

Тук студентите могат да експериментират с различни по времеви размер процеси и да наблюдават в реално време основните **Предимства** на Непрекъснато разпределение:

- бързо и лесно зареждане на нов процес в паметта;
- бързо и лесно адресиране в рамките на процеса и съответно висока скорост на изпълнение на процесите;
- бързо и лесно освобождаване на заетата памет след завършване на процеса.

Също така стават ясни и основните **Проблеми** на Непрекъснато разпределение:

- не е възможно изпълнението на процес, по-голям от физически наличната памет;
- непълноценно натоварване на процесора поради ниската степен на мултипрограмиране;
- непълноценно използване на свободната памет поради външна фрагментация.

Средата TOST позволява на студентите да наблюдават и прилагането на някои техники за **Частично разрешаване** тези проблеми (Bays, 1977):

- Мултипрограмиране със **Swapping**
- Уплътняване на паметта (**Garbage Collector**)
- Стратегии за разполагане (**Job Placement: First-fit, Best-fit, Worst-fit**)

Ясно е обаче, че основният недостатък на Непрекъснатото разпределение – *невъзможност за изпълнение на големи процеси* – няма адекватно решение при тази организация на ОП.

ПРЕКЪСНАТО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ: Основни концепции и елиминирание на проблемите на Непрекъснато разпределение

В основно използваната за обучение по ОС литература (Tanenbaum and Bos, 2016), (Silberschatz, Galvin and Gagne, 2013) са дефинирани основните принципи на страничната виртуална организация на паметта:

- Виртуалният адрес (на процеса) е двукомпонентен – номер на блок (страница) и отместване от началото на блока: $V = (b, d)$.

- Програмата на процеса се компилира с виртуални адреси (във виртуалното му адресно пространство) и **процесорът изпълнява виртуален код**, но информацията се намира заредена в RAM на реални адреси.
- Необходимо преобразуване на виртуалните адреси (от процесора) в реалните адреси в RAM – **Memory Management Unit (MMU)**.

На този етап студентите, чрез експериментиране със симулатор (Фиг.2), се запознават детайлно с принципите и функционирането на MMU.

Функции на MMU:

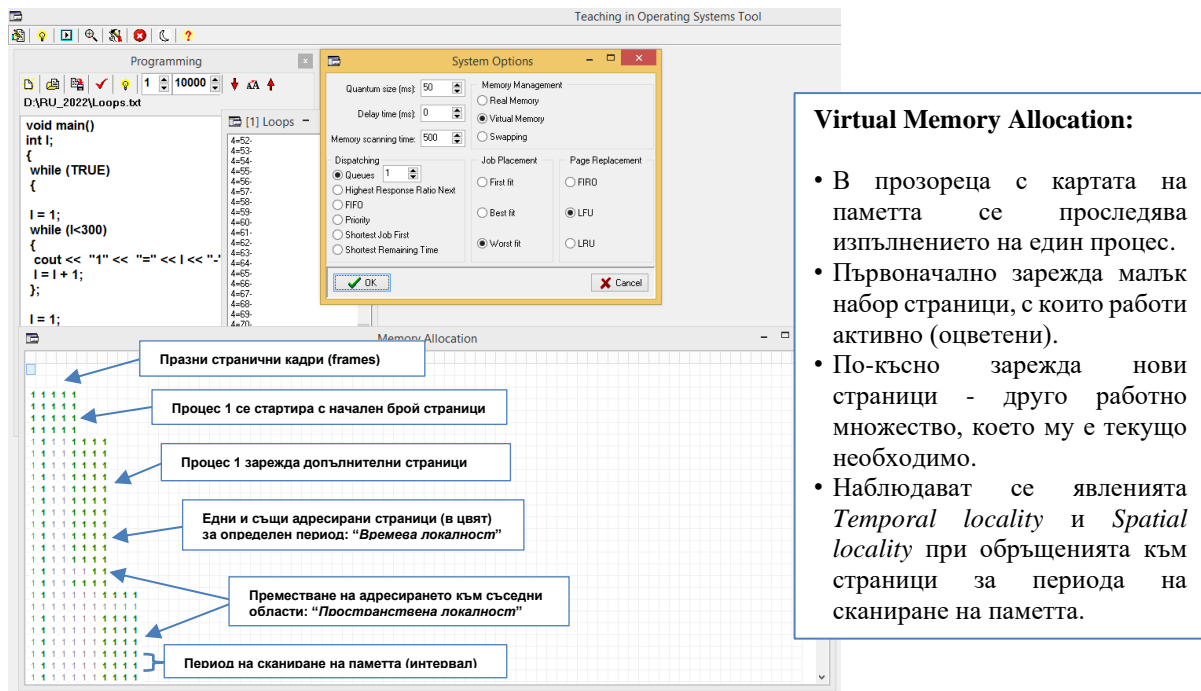
- Преобразуване на виртуалните адреси в реални и работа с Таблицата за Изобразяване на страници (*Page Map Table*);
- Постепенното зареждане в RAM само на тези страници, които са текущо необходими на процеса в произволен свободен страничен фрейм;
- Замяна на страници според различните стратегии.

Фиг. 2. Преобразуване на виртуални адреси в реални и Стратегии за замяна на страници

Превключвайки в TOST на Виртуална памет (*System Options: Memory Management/Virtual Memory*), студентите могат да се запознаят и да наблюдават (Фиг.3) в реално време зареждането, адресирането и замяната на страници при един или няколко стартирани паралелни процеса. При тази настройка на УОП картата на ОП (*Memory Allocation*) вече може да се наблюдава в динамика. При зададен интервал на сканиране на паметта (*System Options: Memory Scanning Time*) студентите могат да:

- стартират и изпълняват голям брой процеси;
- стартират процес, максималният размер на който не зависи от наличната свободна памет;
- наблюдават липсата на участъци от ОП, които са неизползваеми поради Външна фрагментация.

Освен това се визуализира не само разполагането на страниците на отделните процеси в свободните странични кадри, но и към кои страници процесите извършват обръщения за четене и запис в рамките на указания интервал на сканиране на паметта. Това позволява на студентите в реално време да се изследват явленията „*Времева локалност*“ (*Temporal locality*) и „*Пространствена локалност*“ (*Spatial locality*).



Virtual Memory Allocation:

- В прозореца с картата на паметта се проследява изпълнението на един процес.
- Първоначално зарежда малък набор страници, с които работи активно (оцветени).
- По-късно зарежда нови страници - друго работно множество, което му е текущо необходимо.
- Наблюдават се явленията *Temporal locality* и *Spatial locality* при обръщенията към страници за периода на сканиране на паметта.

Фиг. 3. Виртуална памет – зареждане и обръщения към страници

В ангажиментите на студентите по дисциплината е предвидена и курсова задача. Всеки студент трябва да разработи и защити софтуерен проект, демонстриращ функционирането на алгоритъм или стратегия на модул на ОС. Една голяма част от тези задания са свързани с УОП, както при Непрекъснатото разпределение (симулация на стратегиите за разполагане First-fit, Best-fit, Worst-fit), така и касаещи действието на MMU по преобразуването на виртуални адреси в реални при зададена стратегия за замяна на страници.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучаването на концепциите и базовите принципи на организацията и управлението на оперативната памет на компютърните системи представлява сериозно предизвикателство за студентите. В този материал са представени някои от възможностите на авторска интегрирана среда, наречена TOST, специално проектирана да се използва в дисциплините „Операционни системи“ и „Паралелно програмиране“. Демонстрира се прилагането на TOST като ефективно средство при изучаването на концепциите както на Непрекъснатото разпределение (Реална памет), така и на Прекъснатото разпределение (Виртуална памет). Възможността за наблюдение в реално време на информацията от основните таблици на операционната система и детайлните обръщения и адресиране в конкретни странични кадри на RAM позволява на студентите да се ориентират по-добре в преподавания теоретичен материал. TOST се използва от няколко години в катедра „Компютърни системи и технологии“ на Русенския университет и отзивите на студентите са положителни. Липсата на каквато и да е инсталационна процедура, малкият размер и софтуерният лицензът позволяват TOST да бъде използван без ограничения в произволна MS-Windows среда.

ACKNOWLEDGEMENTS

Този доклад се публикува с подкрепата на проект 2022–ЕЕА–01 „Анализ на алгоритми за обработка на големи масиви от данни и тяхното приложение в множество предметни области“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“.

REFERENCES

Bays, C. (1977) ‘A comparison of next-fit, first-fit, and best-fit’, *Communications of the ACM*,

20(3). doi: 10.1145/359436.

Deitel, H. M., Deitel, P. J. and Choffnes, D. R. (2004) *Operating systems*. Pearson/Prentice Hall.

Golemanov, T. and Golemanova, E. (2006) 'A Teaching in Operating Systems Tool', in *CompSysTech'06*.

Silberschatz, A., Galvin, P. B. and Gagne, G. (2013) *Operating System Concepts*. 9. John Wiley & Sons, Inc.

Tanenbaum, A. S. and Bos, H. (2016) *Modern Operating Systems, Education*. Pearson India; 4th edition.

Wilson, P.R., Johnstone, M.S., Neely, M., Boles, D. (1995) 'Dynamic storage allocation: A survey and critical review', in *International Workshop on Memory Management IWMM 95*. Kinross, UK. doi: 10.1007/3-540-60368-9_19.