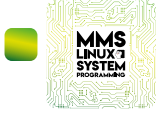
Системно програмиране за Линукс

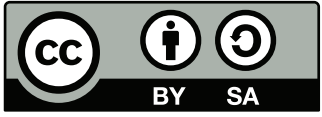
Мултипрограмиране и паралелни процеси. Взаимно изключване.

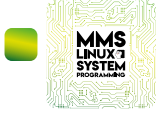
Ангел Чолаков

MMSolutions
A ThunderSoft Company

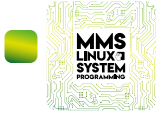
15.04.2021г.





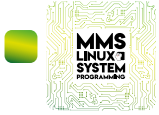


Съдържание I



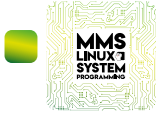
Цел на презентацията

- Да опита да:
  - разшири представите ни за **многозадачност** и **паралелна обработка**;
  - дефинира какво е **поток (нишка)** от изпълнявани инструкции;
  - какви са предизвикателствата при обезпечаването на среда за изпълнение на множество процеси;
  - опише как ОС подсигурява създаването и управлението на подпроцеси (нишки) в един процес;
  - разясни какво са понятията **мъртва хватка** и **критична секция**;
  - представи накратко основни алгоритми за **взаимно изключване** на процеси;



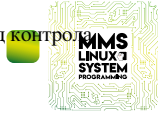
Многозадачност и паралелизъм

- Дефиниция за **паралелни задачи**:
  - две или повече програмни приложения (процеса), изпълняващи се едновременно (или с времеделене) върху един или повече от един процесора или процесорни ядра;
  - всяко едно от тези приложения би могло да включва в състава си един или повече потоци инструкции, диспечерирани от ОС



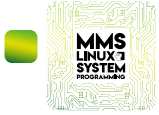
Модел с множество процеси

- Предпоставки:
  - по-пълно оползотворяване на престояващите изчислителни блокове след иницииране на входно-изходни операции, които са съпроводени със значителна латентност;
  - необходимост от провеждане на самостоятелни по своя характер обработки, ангажиращи различни звена от системата (например: декодиране на мултимедиен поток от DSP и обмен на данни по Интернет);
  - необходимост от ускоряване на изпълнението на програма чрез разделянето ѝ на припокриващи се подзадачи, които биха могли да се изпълнят едновременно;
  - едновременно обслужване на заявки от множество потребители на системата
- Системни и потребителски задачи:
  - **системни** са тези, които са ангажирани с управлението на системните ресурси и са част от структурата на ОС;
  - **потребителски**, които получават предварително зададени системни активи и се развиват под контрола на ОС



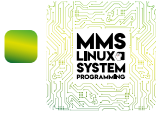
Парарелни процеси

- Разновидности:
  - **независими** - функционират без пряко взаимодействие и споделяне на данни помежду си;
  - **обвързани** - чието изпълнение и развитие във времето е свързано с ползване на общ ресурс, потребност от синхронизация, комуникация и/или ползване на споделени данни
- Типове свързани задания:
  - **кооперращи** се - при които резултатът от работата на един процес оказва влияние върху функциите на други;
  - **конкуриращи** се - при които има явно или индиректно съревнование за достъп до споделени апаратни и/или програмни средства



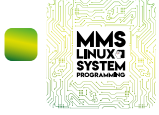
Многозадачност и мултипрограмиране

- Смислово разграничаване:
  - исторически **многозадачността** се свързва с редуващото се във времето последователно превключване на процесора между няколкоко активни програми (чрез диспечериране с времеделене);
  - **мултипроцесната** или **мултипрограмна** обработка - разпаралелването на няколко задания се извършва върху система, снабдена с няколко процесора или процесорни ядра

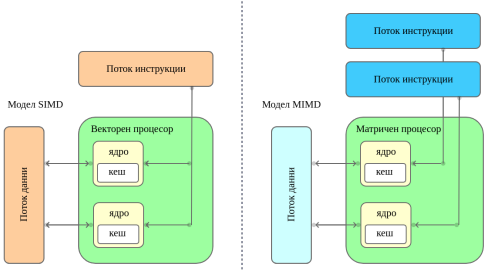


Архитектури, обезпечаващи среда за мултипрограмиране

- Примери:
  - **SIMD** - единичен поток от еднотипни инструкции, приложени върху множество потоци от данни - т.нар. **векторни процесори**;
  - **MIMD** - множество потоци от различни инструкции върху множество потоци от данни - т.нар. **мултипроцесори**, **мултикомпютри** и **клъстери** според организацията на паметта и топологията на свързване



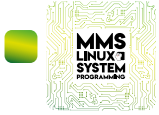
SIMD и MIMD: схематично представяне



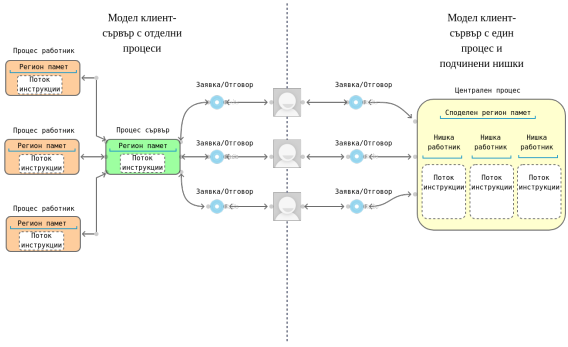
pic. based on work by Vadikus, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

Програмни модели за мултипрограмиране

- Модел **клиент-сървър (client-server)**, състоящ се от:
  - компонент **сървър**, специализиран процес, отговорен за управлението на достъпа до споделен ресурс като процесор, файлова система или периферни устройства;
  - един или множество **клиенти**, представящи логически обекти, асоциирани с действителни потребители или техните процеси, които обслужват заявки за определена услуга;
  - процесите, изобразяващи клиентските и сървърни инстанции, би могло да се развиват и самостоятелно в отделни логически адресни пространства
- Модел **родител-работници (worker-threads)**:
  - родителският процес и потомците се развиват паралелно и се кооперират, но споделят **общо адресно пространство**



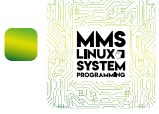
Програмни модели: илюстрация



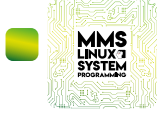
pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_procedure_call`

Модел клиент-сървър

- Недостатъци:
  - централен сървър процес, който приема заявки и ги диспечерира посредством процеси-работници;
  - всеки от новосъздадените процеси се разполага в отделна област на адресното пространство и консумира допълнителна памет и изчислителни ресурси;
  - комуникацията с главния процес се усложнява в зависимост от модела на работа с паметта (сегменти споделена памет) и механизмите за синхронизация и обмен на съобщения

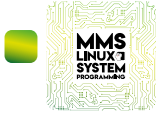


Какъв подход се прилага за облекчаване част от описаните недостатъци?



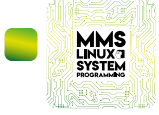
Модел с потоци или нишки

- Дефиниция:
  - обособен **поток от инструкции**, поместен в границите на същото адресно пространство, което е присвоено и на процеса притежател;
  - всеки процес притежава най-малко един основен поток от инструкции и нула или повече допълнителни потоци



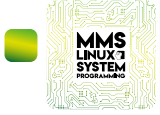
Многозадачност чрез нишки

- Изпълняват се потоци от инструкции, чрез които:
  - една задача може да се разпаралели на припокриващи се успоредно изпълнявани подзадания (вкл. провеждане на входно-изходни операции);
  - породените нишки споделят общо адресно пространство с родителския процес (включително референции към глобални променливи, списък от налични експортирани функции и др.), което елиминира необходимостта от нови таблични структури и записи на странични съответствия;
  - превключването на контекста се опростява, като се премахва изискването за зареждане на нова странична таблица при всяко превключване

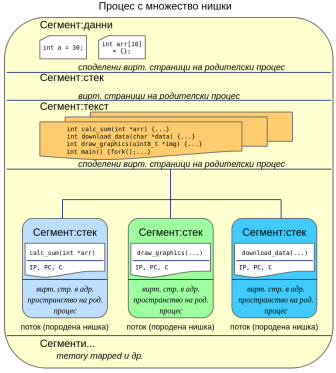


Многопоточно изпълнение

- Организацията на изобразяваните сегменти налага:
  - представяне на всеки поток от инструкции чрез независим стеков сегмент с поддръжка на привързани регистрови структури: програмен брояч или указател на текущо изпълнявана инструкция (PC: program counter);
  - спомагателни структури данни, представящи състоянието на всяка нишка и ползвани от ОС за управление **(TCB - Thread Control Block - може да бъде аналогичен и на Process Control Block в някои ОС)**



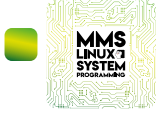
Многопоточно изпълнение: карта на паметта



pic. based on `https://pages.cs.wisc.edu/~remzi/OSTEP/threads-intro.pdf`

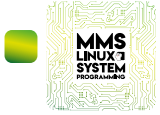
Предизвикателства в мултипрограмирането

- За системните архитекти:
  - проектиране на ОС, така че да се подсигури съвкупност от задачи с оптимално системно натоварване без прекомерно разходване на ресурси;
  - оптимизиране на апаратните компоненти и постигане на ефикасен паралелизъм: както по отношение на достъпваните данни, така и по отношение на изпълняваните инструкции;
  - разработване на механизми за надеждна междупроцесна комуникация и синхронизация при работа с множество процеси и потоци;
  - предоставяне на усъвършенствани програмни средства за профилиране и отстраняване на дефекти



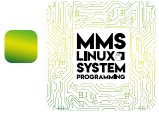
Предизвикателства в мултипрограмирането: продължение

- За софтуерните разработчици:
  - идентифициране на елементи от едно задание, които подлежат на разпаралеляване;
  - разрешаване на зависимости между подзадачите и гарантиране интегритет на обработваните данни;
  - постигане на безпроблемна програмна синхронизация между кооперациращите се и съревноваващи се процеси или нишки;

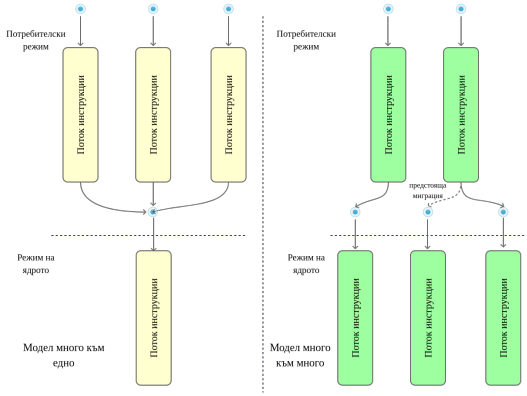


Многопоточен програмен модел: реализация

- Модел **много-към-едно (many-to-one)**:
  - множество нишки в рамките на един процес са привързани към една системна нишка в контекста на ядрото, като последната подсигурява изпълнението на заявените системни извиквания от страна на ОС;
  - управлението на многозадачната работа в потребителското пространство е поверено на системна библиотека, но обръщението към една нишка в ОС прави невъзможно действително хардуерно разпаралеляване;
  - всяко блокиращо системно извикване блокира и останалите логически нишки
- Модел **едно-към-едно (one-to-one)** и **много-към-много (many-to-many)**:
  - за всеки потребителски поток ОС създава и привързва отделна системна нишка на ядрото, която е входна точка за обработване на системни извиквания;
  - механизмът на съответствие може да е статичен или да повери на диспечера на процеси да преразпределя асоциациите

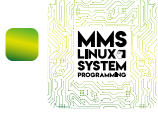


Илюстрация на описаните модели



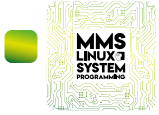
pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Thread_(computing)`

Какъв е подходът, ползван в Линукс? Има ли ограничение за максималния брой създавани нишки?



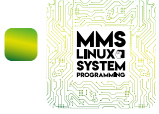
Фактори, усложняващи комуникацията и синхронизацията

- Откроява се:
  - диспечерът на ОС е в състояние да прекъсне и временно преустанови изпълняван процес или поток по всяко време;
  - достъпът до споделени данни или сегменти памет създава предпоставки за нежелани изменения в среда с множество потоци;
  - множество кооперирващи или конкуриращи се процеси или потоци се съревновават за изпълнение и ползване на системни ресурси

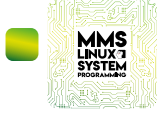


Какво е състезание между процеси или потоци?

- Дефиниция:
  - ситуация, която възниква при неопределено във времето изпълнение на множество потоци от инструкции и при която крайният резултат от обработките не е предвидим и дефиниран
- Пример:
  - един процес или нишка извършва операции по четене на споделени данни, а в същия този момент друг процес или нишка прави изменение на съдържанието на общодостъпните референции данни без наличие на синхрон

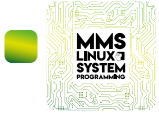


Защо е възможна появата на неочаквано или нежелано състезание? Не са ли всички инструкции апаратно синхронизирани? Достъпът и обновяването на паметта не настъпват ли мигновено?

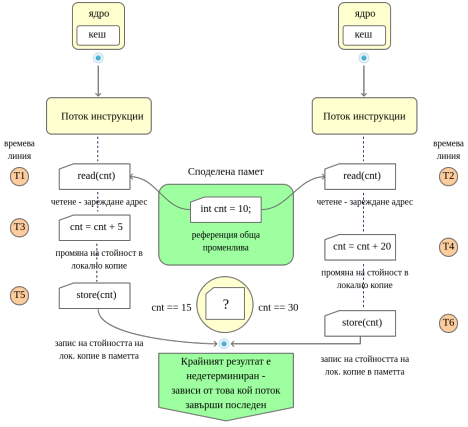


Възникване на междупроцесни състезания

- Предпоставки:
  - асинхронна природа на диспечериране и хардуерно обслужване на програми, обвързано с разпределяне на процесора или присвояваните ядра;
  - конвейерна природа на извличане, изпълнение на инструкции и вътрешната им имплементация в рамките на дадена микроархитектура;
  - наличие на вътрешно буфериране на стойности и управление на йерархични каталожни структури в процеса на виртуализация на паметта;
  - странично-сегментна организация на паметта с възможност за обособяване на споделени сегменти и реферирането им от различни потоци



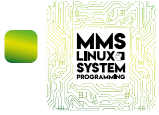
Състезание на процеси: диаграма



pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Race_condition`

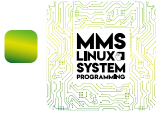
Междупроцесно съревнование: пример

- Кооперирaщи се процеси или потоци, като:
  - единият прочита съдържанието на общодостъпна целочислена променлива и го увеличава с константа;
  - вторият инициира аналогично четене, но намалява съдържанието на променливата с различна константа;
- Крайният резултат зависи от:
  - действителния ред на изпълнение на операциите във времето;
  - представянето на тези операции в последователности от регистрови обработки, като не се гарантира, че една логическа програмна инструкция ще съответства на и ще се реализира физически от една процесорна инструкция

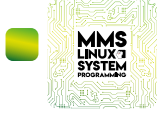


Пояснение към примера

- Нека се фокусираме върху прочитането на споделена променлива:
  - `int a = 20;`
  - `int res = a + 10;`
- Изчислението би могло да се представи чрез следната поредица инструкции:
  - mov 0xfff9a1c, %eax
  - add $0xA, %eax
  - mov %eax, 0xfff9a1c

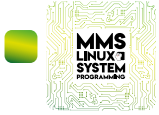


Време за демонстрация с опростена тестова програма...



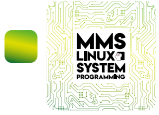
Особености при модел със състезание

- Резултат при състезание:
  - резултатът от обработката е **недетерминиран** и зависи от действителното асинхронно развитие на потоците във времето
- Недетерминираността се дължи на:
  - характера на избор на активна задача от страна на системния диспечер и неговият алгоритъм на работа;
  - неопределените моменти на изпълнение на системните извиквания и съпътстващите ги превключвания на контекста;
  - статистически параметри на цялостния програмен товар, обслужван от системата във времето

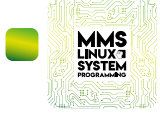


Какво провокира програмно състезание?

- Същност:
  - наличие на последователност от обработки, принадлежащи на повече от една програмни нишки, които достъпват конкурентно споделен ресурс (променлива или обща памет в описания пример)
  - регионът от кода, обвързан с манипулиране на споделения ресурс, се нарича **критична секция**

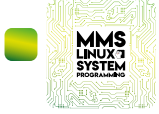


Как да се предпазим от нежелани съревнования?



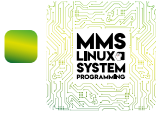
Критична секция и взаимно изключване

- Същност:
  - защитен срещу едновременно паралелно изпълнение регион от инструкции с операции по четене и/или промяна на споделени данни;
  - оригиналната дефиниция на това понятие се приписва на Edsger Dijkstra (с референция към статията: ”Cooperating Sequential Processes”, 1968, `https://www.cs.utexas.edu/users/EWD/transcriptions/EWD01xx/EWD123.html`)

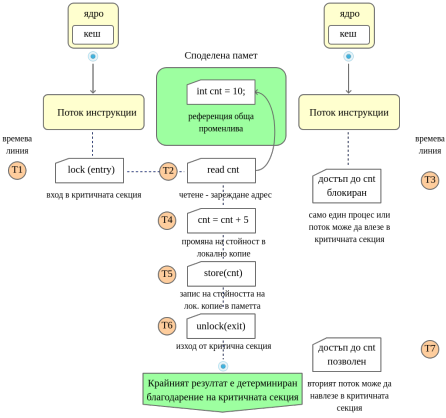


Техника на взаимно изключване на процеси

- Условия за **взаимното изключване (mutual exclusion)**:
  1. само един процес може да се намира в критичната секция след като е получил достъп, а останалите са задължени да изчакат;
  2. допуска се, че оторизираният процес може да престои в критичната секция крайно време;
  3. предполага се, че състезаващите се за достъп потоци също биха получили възможност да влязат в защитената секция за крайно време, но само чрез редуване;
  4. изборът на следващ допускан процес се прави само измежди престояващите в очакване, които не изпълняват в момента код, принадлежащ на критичната секция



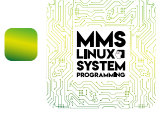
Взаимно изключване: илюстрация



pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Mutual_exclusion`

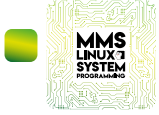
Потенциални проблеми за разрешаване

- При нарушение на описаните условия би могло да възникне:
  - при нарушение на 2. - взаимно блокиране, известно като **мъртва хватка (deadlock)**;
  - при неистинност на 3. - **безкрайно отлагане**

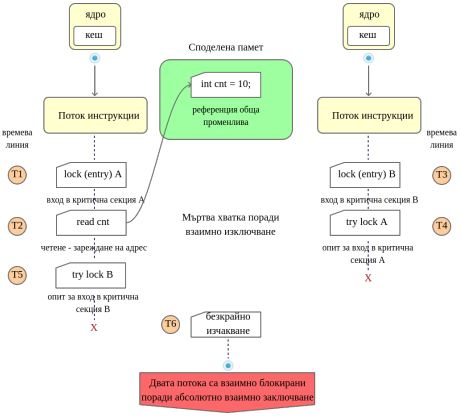


Възникване на мъртва хватка

- Възможни причини:
  - взаимно блокиране между процеси чрез последователно заемане на блокиращ ресурс, който никой не освобождава;
  - некооперативен процес, който се отлага безкрайно и не позволява други да навлезат в заета критична секция;



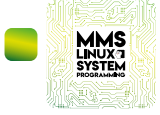
Мъртва хватка: илюстрация



pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Deadlock`

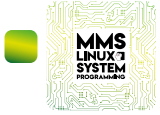
Отговорности на ОС при мултипрограмиране

- Включват:
  - предоставяне на средства **(синхронизационни примитиви)** за групиране на блок операции в критична секция или атомарна защитена транзакция;
  - снабдяване с механизми за целесъобразна междупроцесна комуникация и координация;
  - използване на апаратни и програмни средства за управление на конкуриращи се паралелни процеси и потоци

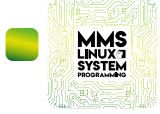


Възможни подходи за взаимно изключване

- Възможности:
  - подход с **монополизиране на процесора** и предотвратяване на паралелно изпълнение на блок от операции върху други ядра или процесори в рамките на критичната секция (атомарни операции и ползване на специализирани инструкции);
  - подход с **блокировка и арбитраж на паметта** в рамките на критичната секция, реализирани отново чрез специфична апаратна поддръжка и набор от инструкции;

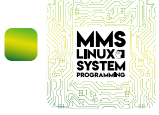


А какви алгоритми за взаимно изключване съществуват?

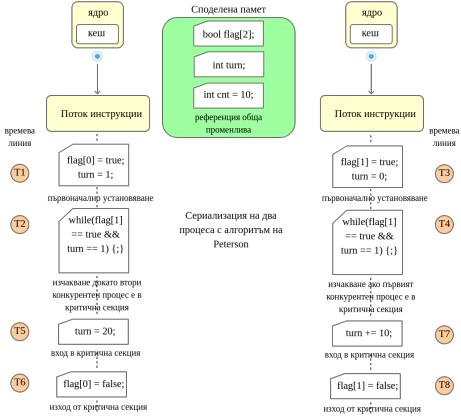


Взаимно изключване на два процеса

- Алгоритъм на Peterson:
  - разработен от Gary Lynn Peterson, изследовател и учен в областта на компютърните науки;
  - ползва масив от Булеви флагове, обозначаващи готовност за всеки от двата конкуриращи се потока;
  - целочислена променлива, която пази реда на следващия позволен за изпълнение процес;
  - поток, желаещ да навлезе в критична секция, установява своя Булев флаг на истинна стойност и записв в реда индекса на конкурента;
  - след изпълнение на обработката и изход от критичната секция всеки процес съхранява в своя Булев флаг стойност неистина;
  - така се подсигурява, че всеки от чакащите процеси ще получи шанс да манипулира ексклузивно споделените данни

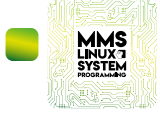


Алгоритъм на Peterson: диаграма



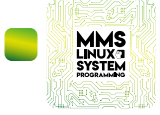
pic. based on `https://en.wikipedia.org/wiki/Peterson%27s_algorithm`

Време за демонстрация: пример с имплементация на алогиритъма на Peterson

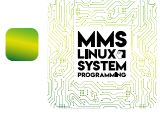


Взаимно изключване на n процеса

- Bakery алгоритъм:
  - развит от Leslie Lamport, разработчик на LaTeX и изследовател в областта на разпределените системи;
  - всеки от конкуриращите се процеси получава номер в нарастваща последователност при заявка за достъп до споделен ресурс;
  - ако два процеса получат еднакъв номер, приоритет се дава на потока с по-малък системен идентификатор;
  - с приоритет в критичната секция навлиза потокът с най-малък разпределен номер или съобразно подхода за разрешаване на конфликт;
  - предвид нарастващите почти уникални идентификатори, алгоритъмът е детерминиран

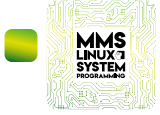


Практическа част: представяне на потоците в Линукс, примери с Posix Threads (libpthread).



Разграничение между процеси и потоци в Линукс

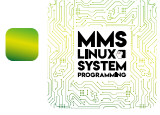
- Имплементация:
  - в Линукс ОС се прилага модел на съответствие **едно-към-едно** в изобразяването на потребителски процес в процес на ниво ядро;
  - не се прави съществена разлика в третирането на потоци и процеси;
  - всеки поток се третира като **LWP (Light Weight Process)** олекотен процес, като потоците също се представят с помощта на процеси в ядрото;
  - една потребителска програма е в състояние да поражда и развива множество потоци, като в този случай асоциираните процеси в ядрото споделят един и същи **групов идентификатор (TGID - thread group identifier)**



Състояния на процесите в Линукс

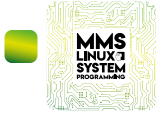
- Пояснение:
  - **Sleeping/Waiting** - (в очакване) или спящи с две разновидности: (interruptible) очакващи програмно прекъсване посредством сигнал или (uninterruptible), които са ангажирани с провеждане на входно-изходна операция или в очакване на апаратно прекъсване;
  - **Running** - (в готовност) като в тази категория попадат готовите за изпълнение и изпълняващите се задачи;
  - **Stopped** - (преустановен), приведен в това състояние посредством сигнал SIGSUSP и по-късно възобновен чрез обработване на сигнал SIGCONT;
  - **Zombie** - (зомби), процес, който е привършил работа, но поради нарушена верига на комуникация или взаимодействие с други процеси неговият контролен блок за управление все още се намира в структурите данни на ОС

Какви програмни средства съществуват за разработка на многопотокови програми?



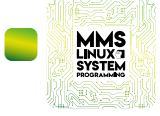
Въведение в Posix threads

- Защо Posix threads и pthread библиотека?
  - разрешава проблема с грижа за особеностите и различията, свързани с апаратната поддръжка на процеси и потоци на ниво микроархитектура;
  - въвежда стандартизиран програмен интерфейс и набор от API функции за имплементиране на многопоточна функционалност;
  - предоставя ефикасна среда за олекотено създаване на нишки, които споделят общо адресно пространство с основния пораждащ процес без утежнения при работа със споделена памет;
  - освобождава разработчиците от познаване на спецификите и детайлите на поддържаните от ОС системни извиквания за многопоточна работа;
  - за UNIX подобните и съвместими ОС Pthreads интерфейсът е стандартизиран като част от `https://standards.ieee.org/standard/1003_1-2008.html`



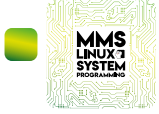
Pthreads: категории налични функции

- Приложните функции са групирани в четири класа:
  - **управление на потоци**: създаване, обединение, управление на атрибути и др.;
  - **синхронизация на потоци**: посредством специализирани помощни примитиви като **ключалки и бариери (locks and barriers)**;
  - **взаимно изключване**: чрез употреба на примитиви за обособяване на критични секции **(mutex)**;
  - **управление на условни блокове и нотификация**: с помощта на функции за боравене с **условни променливи (condition variables)**



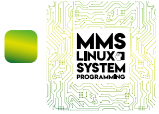
Pthreads: насоки при разработка

- Именуване на функциите:
  - конвенцията приема употреба на префикс: pthread_;
  - процедурите по компилиране и свързване налагат явно указване на Pthreads библиотеката (−lpthread за gcc);
  - повече инфо може да откриете тук: `https://hpc-tutorials.llnl.gov/posix/compiling/`

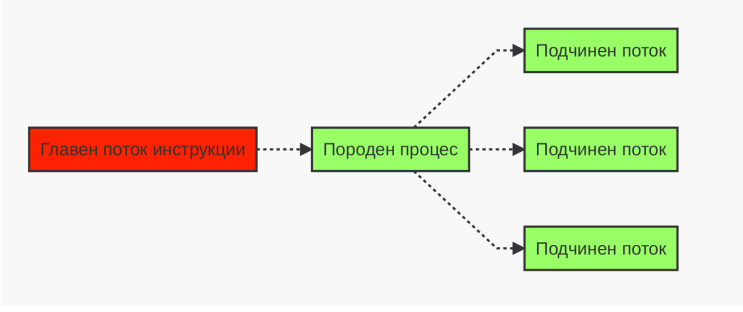


Pthreads: създаване и управление на нишки

- Важни прототипи на функции:
  - pthread_attr_init (attr) - инициализиране на обект с атрибути, включващи статут, политика на диспечериране, размер на стека и др.;
  - pthread_attr_destroy (attr) - освобождаване на референцията към атрибутите;
  - pthread_create (thread , attr , start_routine , arg) - създаване на нишка и запускането ѝ чрез изпълнение на указаната функция: start_routine;
  - pthread_cancel (thread) - заявка за терминиране на изпълнението;
  - pthread_exit (status) - терминиране на текущо изпълняваната нишка



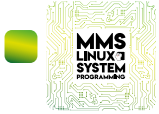
Pthreads: процес с няколо нишки - илюстрация



pic. based on `https://hpc-tutorials.llnl.gov/posix/creating_and_terminating/`

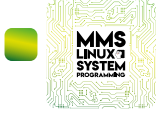
Pthreads: диспечериране на потоци

- Особености:
  - Pthread API не предоставя механизми за обвързване изпълнението на поток с конкретно ядро или процесор;
  - съществуват непреносими решения като pthread_setaffinity_np ;
  - функции, за чиято имплементация е отговорна Линукс ОС, включват например: sched_getaffinity и sched_setaffinity



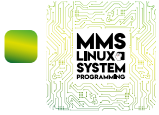
Проектиране на паралелни задания

- Съображения:
  - избор на удачен и ефективен програмен модел и средства за поддръжка;
  - удачно разделяне на задачата на независими или подаващи се на оптимизация подзадачи;
  - стратегия за балансиране на работния товар
  - избор на подходящи механизми за междупроцесна комуникация и синхронизация;
  - арбитриране на достъпа до паметта;
  - оценка на вложените усилия и разходи за разработка

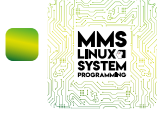


Обезпечаване на паралелизъм

- Обобщение на програмни модели:
  - **Manager/Workers** - една основна управляваща нишка (Manager), която приема входни данни и разпределя координираната им обработка от няколко подпроцеса (Workers);
  - **Pipeline (конвейер)** - пример за разделяне на заданието на последователни подоперации, всяка от която се изпълнява независимо от отделен поток обработчик;
  - **Peer (кооперативен)** - подобен на Manager/Worker, но в този случай Manager потокът също участва и в пряката обработка на данни

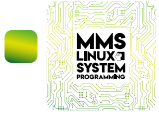


Предстои да разгледаме някои механизми и примитиви за междупроцесна синхронизация и комуникация в следващите лекции



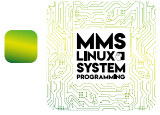
Бележки по материалите и изложението

- материалът е изготвен с образователна цел;
- съставителите не носят отговорност относно употребата и евентуални последствия;
- съставителите се стремят да използват публично достъпни източници на информация и разчитат на достоверността и статута на прилаганите или реферирани материали;
- текстът може да съдържа наименования на корпорации, продукти и/или графични изображения (изобразяващи продукти), които може да са търговска марка или предмет на авторско право - ексклузивна собственост на съотнесените лица;
- референциите могат да бъдат обект на други лицензи и лицензни ограничения;
- съставителите не претендират за пълнота, определено ниво на качество и конкретна пригодност на изложението;
- съставителите не носят отговорност и за допуснати фактологически или други неточности;
- свободни сте да създавате и разпространявате копия съгласно посочения лиценз;



Референции към полезни източници на информация

- https://en.wikipedia.org/
- https://en.wikipedia.org/wiki/Multithreading_(computer_architecture)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Peterson%27s_algorithm
- https://en.wikipedia.org/wiki/Lamport%27s_bakery_algorithm
- https://en.wikipedia.org/wiki/Multiprocessing
- https://en.wikipedia.org/wiki/SIMD
- https://en.wikipedia.org/wiki/MIMD
- https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_section
- https://en.wikipedia.org/wiki/Deadlock
- https://man7.org/linux/man-pages/man3/pthread_setaffinity_np.3.html
- https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc-4.1.1/gcc/Atomic-Builtins.html
- https://pages.cs.wisc.edu/~remzi/OSTEP/threads-intro.pdf
- https://hpc-tutorials.llnl.gov/posix/creating_and_terminating/
- https://search.creativecommons.org/



Благодаря Ви за вниманието!