IAF0542

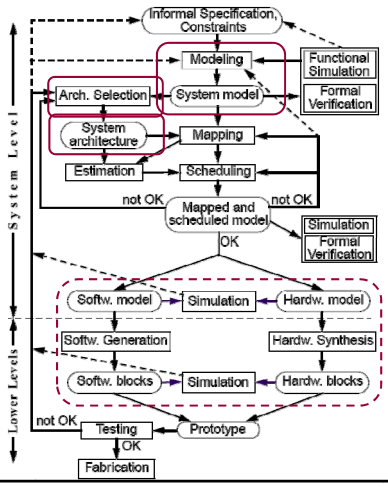
Sardsüsteemid
VII Loeng

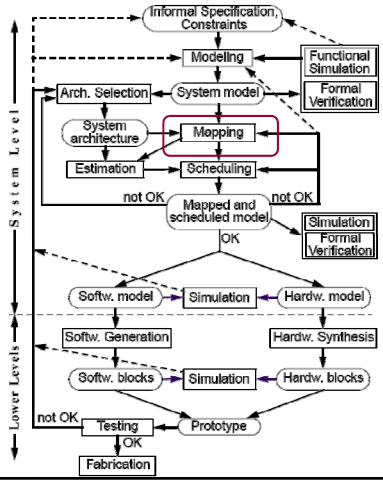
Gert Jervan
Arvutitehnika instituut

ati.ttu.ee/~gerje

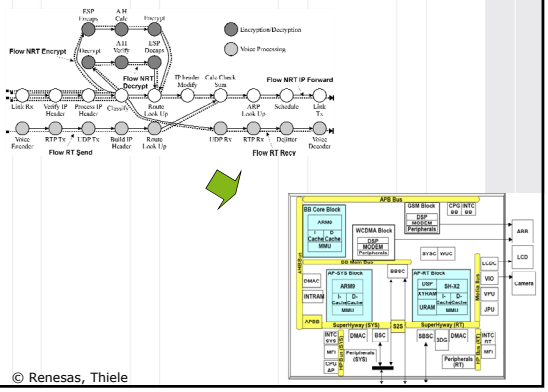
www.pld.tu.ee/IAF0542

Graphics: © Alexandra Nolte, Gesine Marwedel, 2003





Rakenduse sidumine platvormiga



© Renesas, Thiele

Sidumise erinevus

	Embedded	PC-like
Architectures	Frequently heterogeneous very compact	Mostly homogeneous not compact (x86 etc)
x86 compatability	Less relevant	Very relevant
Architecture fixed?	Sometimes not	Yes
MoCs	C+multiple MoCs(SDF, ...)	Mostly von Neumann
Applications	Several concurrent apps.	Mostly single app.
Apps. known at design time	Most, if not all	Only some (e.g. WORD)
Objectives	Multiple (energy, size, ...)	Average performance dominates
Real-time relevant	Yes, very!	Hardly

Probleemi kirjeldus

- On antud
  - Rakendus või rakendused
  - Rakenduste stsenaariumid
  - Kandidaatarhitektuurid, mis sisaldavad
    - Protsessoreid (k.a. heterogeensed)
    - Kommunikatsiooniarhitektuure (k.a. heterogeensed)
    - Võimalikud planeerimispõhimõtted
- Tuleb leida
  - Rakenduste sidumine protsessoritega
  - Sobiv planeerimisalgoritm
  - Arhitektuur
- Eesmärgid
  - Piiraegade saavutamine ja/või jõudluse maksimeerimine
  - Maksumuse, energiatarbe minimeerimine

Sidumisalgoritmide skoop

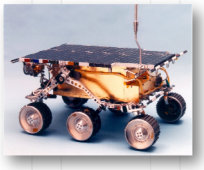
- Riistvarasünteesi terminoloogia:
  - Ressursside jagamine (Resource Allocation)
    Otsus vajalike resursside tüübi ja koguse kohta
  - Ressursside määramine (Resource Assignment)
    Sidumine: Ülesanne → (Riistvara) ressurss
  - Planeerimine
    Sidumine: Ülesanded → Ülesannete algusajad
    Mõnikord on resursside märramine teostatud planeerimisega samaaegselt

Ülevaade

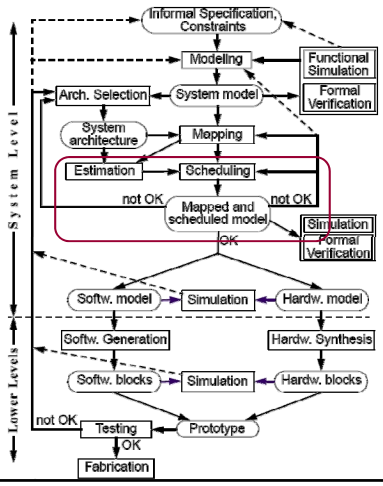
- Reaalajasüsteemid
- Ülesannete planeerimine
- RTOS

The MARS Pathfinder problem

- "But a few days into the mission, not long after Pathfinder started gathering meteorological data, the spacecraft began experiencing total system resets, each resulting in losses of data. The press reported these failures in terms such as "software glitches" and "the computer was trying to do too many things at once"." …



Sard-OS, vahevara, planeerimine (Embedded OS, middleware, scheduling)



Reaalaja süsteemid

- Enamus sardsüsteeme on reaalaja süsteemid
  - Aeg:
    - Süsteemi korrektsus ei sõltu mitte ainult tulemuste loogilisest korrektsusest vaid ka ajast, millal need tulemused on saadud
  - Reaal-:
    - Reaktsioon välistele sündmustele peab toimuma samal ajal sündmusega. Süsteemi aeg peab olema mõõdetav samades ühikutes kui keskkonna aeg
- Näited:
  - Kontrollsüsteemid, tööstussüsteemid, lennundus, autondus, meditsiin, tuumaenergia, militaar, telekommunikatsioon, multimeedia, ...

Reaalaja süsteemid – tüüpilised omadused

- Nad on aja-kriitilised
  - Ajaliste piirangute mittejärgimine võib vähendada teenuste kättesaadavust või viia katastroofiliste tagajärgedeni
- Sisaldavad mitmeid paralleelselt täidetavaid ülesandeid
  - Ülesanded jagavad ühiseid ressursse, nagu näiteks protsessor, kommunikatsioonikanalid. Suhtlevad omavahel. Seetõttu on üheks peamiseks probleemiks ülesannete planeerimine
- Töökindlus ning veakindlus on esmatähtsad
  - Palju on ohutus-kriitilisi rakendusi

Nõrgad ja ranged reaalaja süsteemid

- Ajalised piirangud on tüüpiliselt esitatud piir-aegadega (*dedline*), mis määravad ära aja, millal ülesande (*task*) täitmine peab lõppema.
- Ülesandele seatav piir-aeg võib olla:
  - Range (*hard dealine*): tuleb täielikult ja alati saavutada. Mittesaavutamine võib tuua katastroofilised tagajärjed
    - Garanteerida eelnevalt ja off-line
  - Nõrk (*soft deadline*): ülesanne võib lõppeda peale sellele ette nähtud piir-aega, kuid tulemuse väärtus võib aja jooksul väheneda
  - Kindel (*firm deadline*): sarnane rangele, kuid ei järgne katastroofilisi tagajärgi. Tulemus ei oma peale piir-aega mingit väärtust

Range, kindel, nõrk...

- Näited rangetest tegevustest
  - Andmete kogumine sensoriga
  - Kriitiliste tingimuste avastamine
  - Aktuaatorite juhtimine
  - Kriitiliste komponentide madala taseme juhtimine
- Näited nõrkadest tegevustest
  - Kasutajaliidese interpreteerimine
  - Klaviatuurilt tuleva informatsiooni töötlemine
  - Ekraanidele edastatav informatsioon
  - Graafilised kasutajaliidesed
  - Aruannete salvestamine

Ennustatavus

- Ennustatavus (*predictability*) on reaalajasüsteemide üks kõige tähtsamaid omadusi
- Ennustatavus tähendab, et on võimalik tagada nõuetega paika pandud piir-aegade täitmine:
  - Ranged piir-ajad on alati täidetud
  - Nõrgad piir-ajad on täidetud nii palju, et vajalik teenusekvaliteet (*quality-of-service – QoS*) on tagatud

Täitmise ajad

- **Def**.: The **worst case execution time** (WCET) is an **upper bound** on the execution times of tasks.
  - The term is not ideal, since a program requiring the WCET for its execution does not have to exist (WCET is a **bound**).
- **Def**.: The **best case execution time** (BCET) is a lower **bound** on the execution times of tasks.
  - The term is not ideal, since a program running at the BCET for its execution does not have to exist (BCET is a **bound**).

Täitmise ajad (2)

- Keerukus:
  - Tavalisel juhul ei ole võimalik määratleda, kas piirang eksisteerib
  - "Klassikalistel" arhitektuuridel suhteliselt lihtne. Uutel, kus on konveierid, cache'id, katkestused, virtuaalmälud, jne. on see märgatavalt keerukam
- Meetodid
  - Riistvara: vaja teada täpset ajalist käitumist
  - Tarkvara: vajalik vähemalt assembler. Kõrgtasemel sisuliselt võimatu

Keskmised täitmise ajad

- Hinnangulised maksumuse ja jõudluse väärtused
  - Väga keeruline saada piisavalt täpseid hinnanguid
  - Täitmise aeg v. täpsus
- Täpsed maksumuse ja jõudluse väärtused
  - On saadavad tavaliste töövahenditega (näiteks kompilaatorid)
  - On nii täpsed, kui täpsed on sisendandmed

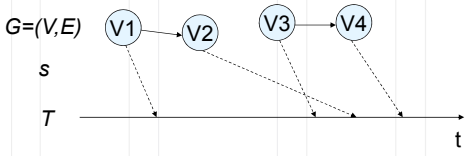
Ennustatavus (2)

- Ennustatavuse probleemid:
  - Kuidas määratleda iga ülesande WCET?
  - Kuidas määratleda kommunikatsiooni WCET?
  - Kuidas määratleda OSi poolt põhjustatud lisakulud (katkestuste töötlemine, ülesannete haldamine, context switching jne.)?
  - Kui kõik eelnev on vastuse leidnud, siis jääb veel SUUR KÜSIMUS:

    Kas kõik ülesanded ja nendega seotud kommunikatsioon on planeeritav olemasoleval arhitektuuril, nõnda et piir-ajad on täidetud?

Reaalaja planeerimine

- Assume that we are given a task graph G=(V,E).
- **Def.**: A **schedule** s of G is a mapping
  $V \rightarrow T$
  of a set of tasks V to start times from domain T.



Schedule → programm

Planeerimine (2)

- Planeerimise probleem:
  - Millised ülesanded ja milline kommunikatsioon tuleb täita millisel ajahetkel antud ressursil, nii et ajalised piirangud on täidetud?
- Seega:
  - planeerimine peab täitma mitmeid nõudeid: ressursid, sõltuvused, piir-ajad
- Planeerimist tuleb teostada süsteemi loomise käigus korduvalt

Planeerimine (3)

- Teatud ülesannete hulk on planeeritav (*schedulable*), kui etteantud planeerimismeetodi puhul kõik piirangud saavad täidetud (mis tähendab, et lahendus planeerimise probleemile on leitav)
- Vähemalt rangete reaalajasüsteemide puhul tuleb planeerimist teha off-line'is, enne süsteemi tööle rakendamist.

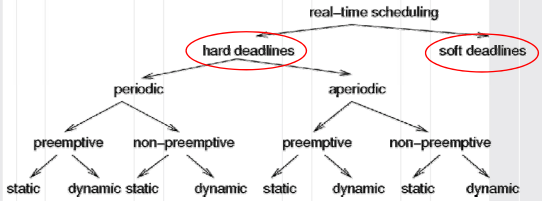
Ülesannete omadused

- Mida me eeldame, et teame ülesande kohta?
  - Arvutusaeg (worst case), *c*.
    Kommunikatsiooni puhul me eeldame, et teame kommunikatsiooniks kuluvat aega
  - Ülesande piir-aega *d*
  - Ülesande saabumise regulaarsust:
    - Perioodilised ülesanded, perioodiga *T* (identsete ülesannete lõputu jada)
    - Mitteperioodilised ülesanded, ilma fikseeritud saabumise perioodita:
      - Sporaadilised ülesanded: piiratud vähima saabumiste vahelise ajaga: piir-aegu saab garanteerida off-line'is
      - Kui neid piiranguid ei ole teada siis süsteem ei ole planeeritav

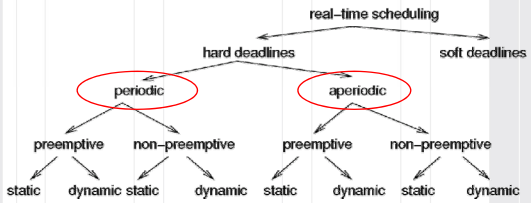
Ülesannete omadused (2)

- Ülesannete vahelised seosed
  - Järgnevused
    - Rakendusspetsiifilised järgnevused (ülesanne T2 tuleb alati täita peale ülesannet T1, sõltumata sellest, et T2 ei saa T1-lt mingeid andmeid)
    - Andmesõltuvused (meenutage andmevoo mudeleid)
  - Ressursside sõltuvused
    - Jagatud ressursid: protsessorid, siinid, perifeeriaseadmed, puhvrid jne.

Planeerimisalgoritmide klassifikatsioon

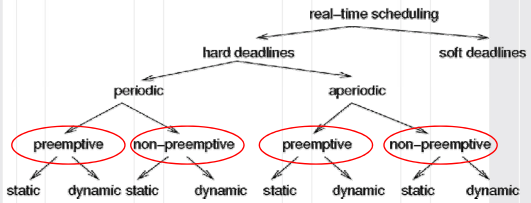


Planeerimisalgoritmide klassifikatsioon



- Perioodilisteks nimetatakse ülesandeid, mida täidetakse iga *T* ajaühiku tagant. Iga perioodilise ülesande järjekordset täitmist nimetatakse tööks (*job*)

Planeerimisalgoritmide klassifikatsioon

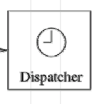


- Katkestavad (*preemptive*) planeerijad: kasutatakse, kui
  - Mõned ülesanded on pikkade täitmisaegadega, või
  - Reageerimine välissündmustele peab olema lühike
- Mitte-katkestavad (*non-preemptive*) planeerijad:
  - Kõik ülesanded töötavad, kuni on lõpetanud. Reageerimine välistele sündmustele võib võtta kaua aega

Dünaamiline/staatiline planeerimine

- Dünaamiline/online planeerimine:
  - Protsessori aja eraldamine toimub jooksvalt, põhinedes seni saabunud informatsioonil
- Staatiline/offline planeerimine:
  - Planeerimine, kus kasutatakse *a priori* teadmisi ülesannete saabumisest, täitmisaegadest, ja piir-aegadest. Eraldi dispetžer protsessori aja jagamiseks. Timer kasutab disaini loomise käigus genereeritud tabelit.

Time	Action	WCET
10	start T1	12
17	send M5	
22	stop T1	
38	start T2	20
47	send M3	

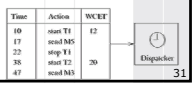


Planeerimisstrateegiad

- Staatiline tsükliline planeerimine (*static cyclic scheduling*)
  - Off-line'is genereeritakse tabel, mis sisaldab iga ülesande (kommunikatsiooni) aktiveerimise aegu. Tabelis olevat aktiveerimiste järgnevust korratakse tsükliliselt
- Prioriteetidepõhine planeerimine (*priority based scheduling*)
  - Ülesanded aktiveeritakse mingi sündmuse mõjul. Kui tekib konflikt, siis arvestatakse ülesannete prioriteetidega
  - Prioriteete võib määrata:
    - Staatiliselt (fikseeritakse off-line ja jäävad muutumatuks)
    - Dünaamiliselt (muutuvad täitmise käigus)

Time-triggered systems (1)

- *In an entirely time-triggered system, the temporal control structure of all tasks is established a priori by off-line support-tools. This temporal control structure is encoded in a Task-Descriptor List (TDL) that contains the cyclic schedule for all activities of the node. This schedule considers the required precedence and mutual exclusion relationships among the tasks such that an explicit coordination of the tasks by the operating system at run time is not necessary. ..*
- *The dispatcher is activated by the synchronized clock tick. It looks at the TDL, and then performs the action that has been planned for this instant [Kopetz].*



Time-triggered systems (2)

- ***… pre-run-time scheduling is often the only practical means of providing predictability in a complex system.*** [Xu, Parnas].
- It can be easily checked if timing constraints are met.
  The disadvantage is that the response to sporadic events may be poor.

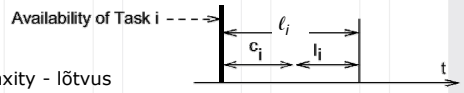
Tsentraalne ja hajutatud planeerimine

- Tsentraalne ja hajutatud planeerimine
  - Multiprotsessor planeerimine kas lokaalselt ühel või mitmel protsessoril
- Mono- ja multiprotsessor planeerimine
  - Lihtsamad planeerimisalgoritmid ühe protsessori jaoks
  - Keerukamad algoritmid mitme protsessori jaoks
    - Algoritmid homogeensedte multiprotsessorsüsteemide jaoks
    - Algoritmid heterogeensete multiprotsessorsüsteemide jaoks

Planeerimine ilma järgnevuste arvestamiseta

Aperioodiline planeerimine

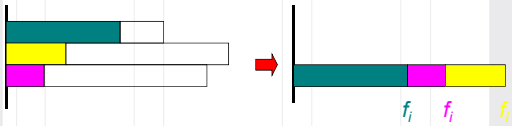
- ✓ Let $\{T_i\}$ be a set of tasks. Let:
  - c_i be the execution time of T_i ,
  - d_i be the **deadline interval**, that is, the time between T_i becoming available and the time until which T_i has to finish execution.
  - ℓ_i be the **laxity** or **slack**, defined as $\ell_i = d_i - c_i$



Laxity - lõtvus

Üheprotsessoriline süsteem

- Võrdsed saabumisajad
  - Katkestamine on mõtetu
- **Earliest Due Date (EDD)**: Execute task with earliest due date (deadline) first.



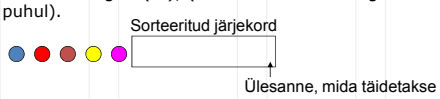
EDD requires all tasks to be sorted by their (absolute) deadlines. Hence, its complexity is *O(n log(n))*.

Earliest Deadline First (EDF)

- Erinevad saabumisajad. Katkestamine võib vähendada hilinemist
- Horni teoreem:
  - [Horn74]: Given a set of *n* independent tasks with arbitrary arrival times, any algorithm that at any instant executes the task with the earliest absolute deadline among all the ready tasks is optimal with respect to minimizing the maximum lateness.

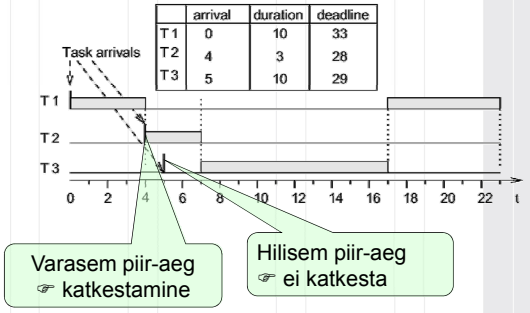
EDF algoritm

- EDF algoritm:
  - Iga kord kui uus ülesanne saabub:
  - Lisatakse see valmis ülesannete järjekorda, sorteerituna nende absoluutsete piir-aegade põhjal. Täidetakse ülesannet, mis on järjekorras esimene.
  - Kui saabunud ülesanne pannakse järjekorras esimeseks, siis hetkel täidetav ülesanne katkestatakse.
- Lihtne lähenemine sorteeritud järjekordadega (iga saabuvat ülesannet võrreldakse kõigi ülesannetega) nõuab tööaega O(n^2); (väiksem kahendotsingu puhul).



EDF - näide

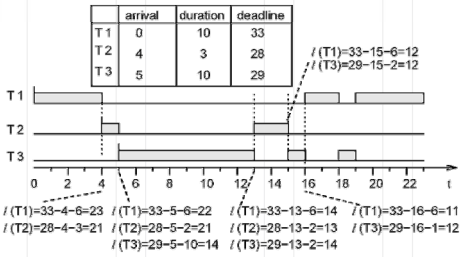
	arrival	duration	deadline
T1	0	10	33
T2	4	3	28
T3	5	10	29



Least laxity (LL), Least Slack Time First (LST)

- Prioriteedid pöördvõrdeline lõtvusega (mida vähem lõtv, seda kõrgem prioriteet), dünaamilised prioriteedid, katkestav

	arrival	duration	deadline
T1	0	10	33
T2	4	3	28
T3	5	10	29



LL (LST) omadused

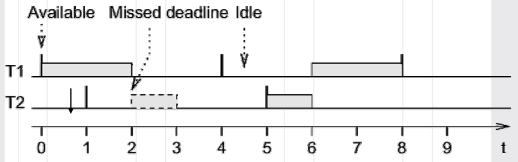
- Ei piisa planeerija väljakutsumisest (ja lõtvuse arvutamisest) ainult ülesannete saabumise hetkel
- Planeerija väljakutsumise lisakulu
- Palju context switch'e
- Avastab üle minevad piir-ajad varakult
- Optimaalne monoprotsessor süsteemidele
- Dünaamilised prioriteedid → ei saa kasutada fikseeritud prioriteetidega OSides
- Vajab informatsiooni täitmisaegade kohta

Mittekatkestav planeerimine

- Kui ülesannete katkestamine ei ole lubatud, siis optimaalsed programmid võivad jätta protsessori ootele, et lõpetada ülesanded, milledel on lühikesed piir-ajad, kuid mis saabuvad hilja

Mittekatkestav planeerimine

- T1: perioodiline, $c_1 = 2$, $p_1 = 4$, $d_1 = 4$
- T2: vahel saadaval ajahetkel $4*n+1$, $c_2 = 1$, $d_2 = 1$
- T1 peab alustama $t=0$
- Piiraeg ületatud, kuid programm oleks võimalik (kui alustada T2 esimesena) → planeerimine ei ole optimaalne



Me peame teadma tulevikku!

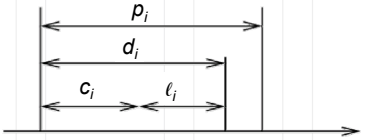
Perioodiline planeerimine

Staatiline tsükliline planeerimine

- Off-line'is genereerida aktiveerimisajad kõikidele ülesannetele
  - Need aktiveerimisajad määravad ära süsteemi käitumise üle (hüper)perioodi T^h
  - Seda jada korratakse tsükliliselt
- Kui kõikidel ülesannetel on sama periood T → $T^h = T$
- Kui ülesannetel on erinevad perioodid T_1, T_2, …, T_n, siis T^h on T_1, T_2, …, T_n vähim ühiskordne

Perioodiline planeerimine

- Olgu:
  - p_i ülesande T_i periood,
  - c_i ülesande T_i täitmisaeg
  - d_i ülesande piir-aja ***intervall***, see on ajavahemik, millal ülesanne T_i on valmis täitmiseks ning seesama ülesanne T_i peab olema täidetud.
  - ℓ_i on lõtvus (**laxity** or **slack)**, defineeritud kui $\ell_i = d_i - c_i$



Keskmine koormatus

- Keskmine koormatus:

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i}{p_i}$$

Vajalik tingimus süsteemi planeeritavuse tagamiseks (m=protsessorite arv):

$$\mu \leq m$$

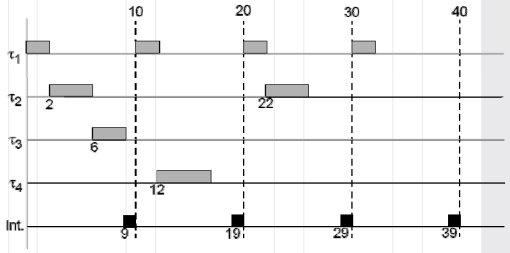
Staatiline tsükliline planeerimine (2)

- Näide: 4 sõltumatut ülesannet ühel protsessoril

	Period=deadline	Worst case comp. time
τ_1	10	2
τ_2	20	4
τ_3	40	3
τ_4	40	5
System management	10	1

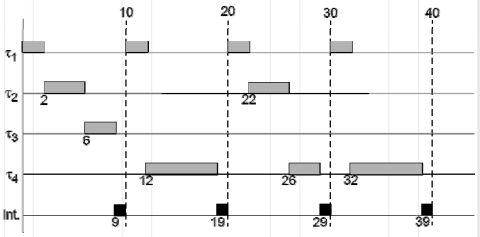
T^h = LCM(10, 20, 40) = 40

Staatiline tsükliline planeerimine (3)

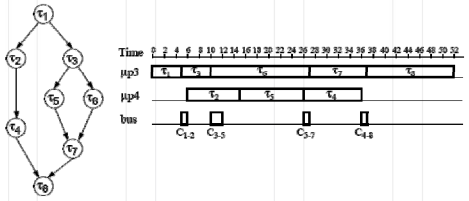


Staatiline tsükliline planeerimine (4)

- Sama näide, kuid τ4 täitmisaeg on 17. Ilma katkestamiseta ei saa me ehitada programmi!



Staatiline tsükliline planeerimine (5)



List Scheduling

- Staatilise tsüklilise planeerimise jaoks sobib *list scheduling*:
  - Iga ressursi jaoks on olemas nimekiri valmis ülesanneteks. See sisaldab neid ülesandeid, mis on mõeldud täitmiseks sellel ressursil, kuid mis ei ole veel planeeritud. Samas, kõik nende eellased on planeeritud ja lõpetanud oma töö.
  - Ülesandeid võetakse nimekirjadest ning planeeritakse mingi prioriteedi funktsiooni alusel

Staatiline tsükliline planeerimine

- Mis on head küljed:
  - Väga hästi ennustatav
  - Kerge siluda
  - Väike lisakulu
- Mis on halvad küljed:
  - Ei ole painduv:
    - Kvaliteet väheneb märgatavalt kui täitmisajad erinevad eeldatutest
    - Kui lisatakse uusi ülesandeid tuleb kogu programm ümber arvutada
  - Katkestuste käsitlemine:
    - Staatiliselt eraldatud ajahetked
  - Tuleb vältida väga pikki hüperperioode
    - Üksikute ülesannete perioode peab ühtlustama → kunstlikult vähendatud perioodid → suurenenud koormus → protsessori aja raiskamine
  - Manuaalne tükeldamine, et mahuks perioodidesse