



IMS Projekt 2021

Téma č. 2: Ekonomika v době lockdownu a zotavenie ekonomiky

Peter Rúček, xrucek00
Rebeka Černianska, xcerni13

1. Úvod

Táto práca sa zaoberá modelovaním¹ [slide 8], a simuláciou¹ [slide 8] celosvetovej zmeny kapacity výroby polovodičov ako odpoveď na rastúci dopyt. Model¹ [slide 7] sleduje jednotlivé parametre, ktoré ovplyvňujú čas potrebný na výrobu polovodičov vo fabrike.

Hlavným cieľom tejto práce je overiť validitu použitého modelu. Následne, po overení validity je cieľom porovnať túto modelovú fabriku k celosvetovej produkcii polovodičov.

Vzhľadom na stále pretrvávajúci nedostatok polovodičov je žiaduce hľadať efektívne riešenia pre navyšovanie celosvetovej kapacity výroby. Preto je cieľom tejto práce preskúmať efektivitu menších fabrík a vyhodnotiť ich výstavbu ako možné riešenie zvyšovania kapacity. Je samozrejmé, že fabrika s menšou výrobnou kapacitou vyrobí menšie množstvo polovodičov, ako tá s veľkou kapacitou, z čoho takisto vyplýva, že vplyv menšej fabriky na celkovú výrobu bude menší. Otázkou však ostáva, ako veľmi dokážu malé fabriky pomôcť pri pohľade na súčasnú situáciu, a či sú riešením pre nedostatok polovodičov.

Otázku validity pomáhajú riešiť experimenty zamerané na jej overenie, a dáta, ktoré sprevádzajú štúdiu², z ktorej bol model čerpaný. Otázky o vplyve malých fabrík na celosvetovú kapacitu výroby skúmajú experimenty zamerané na simulovanie situácie, kedy by celkovú kapacitu museli zaobstarať práve nízkokapacitné fabriky.

Experimenty jednoznačne poukázali na fakt, že z pohľadu celkovej výroby polovodičov na svete sú fabriky s menšou výrobou veľmi malým prínosom v porovnaní s gigantami v oblasti. Preto malé fabriky nie sú riešením aktuálnej situácie, vzhľadom na to, že veľké fabriky z tohto pohľadu prinášajú viac výhod.

Výsledky validačných experimentov boli porovnávané s dátami nachádzajúcimi sa v zdrojovej štúdii, pričom boli porovnané ich validačné dáta a tie zistené v tejto práci. V ostatných experimentoch sa pracovalo s predpokladom, že model je validný. V rámci tejto problematiky boli vyhľadávané dáta, s ktorými by bolo možné porovnať výsledky experimentov a vyvodenie záverov o danej situácii.

1.1 Autori a zdroje informácií

Autormi tejto práce sú Peter Rúček (xrucek00), a Rebeka Černianska (xcerni13). Informácie boli získavané z verejne dostupných odborných článkov a štatistík. Ako hlavný zdroj informácií o procese výroby a takisto zdroj pre základný koncept modelu slúžil článok "An integrated model for adjustment of process parameters to recover throughput shortage in semiconductor assembly: A case study." ². Iné články poskytovali dáta, ktoré sa používali pri experimentoch^{3,4,5,6,7}.

Informácie, ktoré sa používali v projekte boli overované z viacerých zdrojov a navzájom kontrolované. Ako hlavné zdroje boli vybrané štúdie a články zastrešované verejne známymi inštitúciami, čím sa pridáva na dôveryhodnosti použitých údajov.

1.2 Overovanie validity modelu

Na overovanie validity modelu¹ [slide 37] bol zameraný experiment¹ [slide 9] 1, ktorý porovnáva výsledky nášho modelu s referenčnými údajmi prebraného modelu. Ďalej boli výsledky modelu porovnané s verejne dostupnými údajmi týkajúcich sa polovodičových fabrík a bolo zistené, že skúmaný model naozaj vykazuje známky modelu malej až stredne veľkej fabriky na výrobu polovodičových súčiastok.

2. Rozbor témy a použitých metód/technológií

Krátko po začiatku pandémie Covid-19, celosvetový trh v mnohých odvetviach zaznamenal nedostatok produktov obsahujúcich polovodiče v porovnaní s dopytom, ktorý vznikol. Táto situácia bola spôsobená niekoľkými faktormi³.

Jedným z nich bol prudký nárast dopytu po spotrebiteľskej elektronike, ktorý vznikol po zavedení lockdownu v jednotlivých krajinách. Ďalším dôležitým faktorom je neustály vývoj technológií, ktorý spôsobuje nárast v kusoch polovodičov v jednotlivých produktoch. Takouto oblasťou je napríklad automobilový priemysel, kde stúpajúci počet pokročilých technológií vyžaduje použitie väčšieho počtu polovodičov³. Nedostatok polovodičov sa v priemysle vyskytuje do dnešného dňa a je pravdepodobné, že ešte nejaké obdobie bude pretrvávať.

Ako riešenie nedostatku polovodičov sa celosvetovo začala výstavba fabrík na ich výrobu, ktorá by mala zvýšiť celosvetovú kapacitu produkcie. Nové fabriky by mali zvýšiť kapacitu výroby natoľko, aby bolo možné naplniť súčasný dopyt, a takisto v budúcnosti predísť podobným krízam.

Z oficiálneho vedeckého článku² je prevzatý model pre výpočet kapacity výroby polovodičov vo fabrike. Použité hodnoty sú z tejto štúdie, kde sú pre jednotlivé parametre vypočítané intervaly hodnôt, ktoré môžu nadobúdať. Je dôležité pripomenúť, že v spomínanej práci sa zaoberajú iným fenoménom v oblasti výroby polovodičov a tak sa z nej využil iba model fabriky s príslušnými premennými a ich ukážkové hodnoty.

Samotný proces výroby polovodičov je zložený z niekoľkých fáz, ktoré majú presne určené poradie v akom sa musia vykonať. Tento proces je znázornený na *Obrázku 1*, v kapitole 3.1. Každá fáza pozostáva z menších časových celkov, ktoré reprezentujú rôzne čakacie doby v priebehu procesu výroby.

Model, ktorý sa používa predstavuje malú, až stredne veľkú fabriku. Jej kapacita výroby je približne 2,5 milióny polovodičov mesačne. Pre porovnanie, fabriky ktoré sú v procese výstavby budú veľkokapacitné a z verejných údajov o produkcii jednotlivých fabrík sa zistilo, že fabriky s vysokou kapacitou vyrábajú v priemere okolo 5 miliónov polovodičov mesačne. Hodnoty, ktoré hovoria o počte vyrobených polovodičov boli vypočítané z verejných dát⁷ o produkcii jednotlivých firiem.

Celková kapacita výroby fabriky predstavuje počet kusov wafov, alebo počet kusov polovodičov, ktoré je schopná vyprodukovať. Počet kusov polovodičov je možné vypočítať pomocou údajov veľkosti wafov a počtu kusov polovodičov na jednom z nich. V literatúre⁷ sa tento údaj počíta za mesiac výroby, teda koľko je fabrika schopná vyprodukovať za 30 dní výroby.

Celosvetová kapacita výroby sa sleduje v kusoch polovodičov, ktoré sú celosvetovo dodávané⁴. V roku 2019 bol zaznamenaný pokles v počte kusov, ktoré boli dodané. Po tomto roku začalo toto číslo opäť stúpať, no až v roku 2021 sa dostalo na úroveň, v ktorej bolo pred rokom 2019. Pokiaľ by sa stúpanie dodávky v najbližších rokoch správalo tak, ako medzi rokmi 2014-2018, je možné predpokladať že ročne bude stúpať dodávka o približne 6,25%.

2.1 Použité postupy

Na implementáciu modelu bol využitý jazyk C++⁵, na preklad zdrojových súborov sa použil nástroj Make⁶. Program je preto ľahko prenositeľný medzi rôznymi platformami, čo umožňuje využitie pre širšiu skupinu užívateľov.

2.2 Pôvod metód

Základný model bol prevzatý z vedeckého článku spomenutého v sekcii 2. Je implementovaný sústavou matematických rovníc, pričom bol využitý v plnej miere. Pri implementácii boli zistené nezrovnalosti medzi rovnicami a ich popisom v schémach a vysvetlení v texte. Preto boli upravené tak, aby sa zhodovali. Primárne išlo o jednotlivé parametre, ktoré sa medzi rovnicami nezhodovali a bolo potrebné zjednotiť postup tak, ako bol popísaný v texte štúdie.

3. Konceptcia modelu

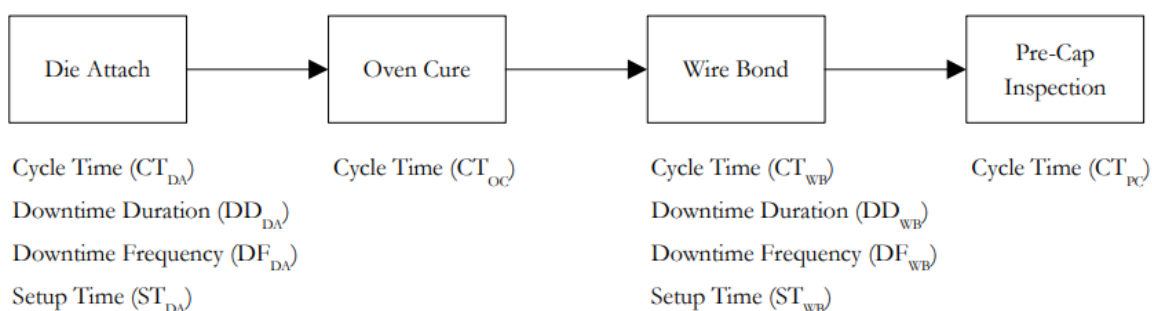
Táto sekcia sa zaoberá popisom abstraktného modelu¹ [slide 10] fabriky na výrobu polovodičov. Model je prebratý z vedeckého článku² popísaného v sekcii 1.1. Autori model získali z pozorovania reálnej fabriky. V sekcii 3.1 je popísaná a načrtnutá schéma systému. V sekcii 3.2 je model popísaný rovnicami, ktoré popisujú daný systém. Výsledná rovnica modeluje počet vyrobených polovodičov za jednotku času vo takejto fabrike.

3.1 Vyjadrenie konceptuálneho modelu

Model reprezentuje montážnu linku polovodičov, ktorá pozostáva z (názvy boli ponechané z pôvodného článku², aby pri preklade nevznikli možné nedorozumenia) :

- 3 die attach machines
- 4 oven cure machines
- 9 wire bond machines
- 3 pre-cap inspection machines.

Obrázok 1 ukazuje priebeh procesov a zodpovedajúce parametre v každom procese.



Obrázok 1 - Priebeh procesov na montážnej linke polovodičovej fabriky

Ďalej bolo potrebné v modeli identifikovať rozsah hodnôt parametrov procesov. Tabuľka 1 ukazuje klasifikáciu parametrov procesov a ich hodnoty. Údaje boli zhromaždené z databázy výrobného systému za dobu 30 dní. Nespracované údaje boli vložené do normálneho rozdelenia¹ [slide 87] (cycle time (CT)) a do exponenciálneho rozdelenia¹ [slide 87] (Downtime Duration (DD), Downtime Frequency (DF), Setup Time (ST)). 95% interval spoľahlivosti určuje dve úrovne parametrov procesu, ktorými sú minimálna a maximálna hodnota.

Input Parameters	Unit	Value		
		Low	Middle	High
Cycle Time Die Attach (CT _{DA})	seconds	2.8072	-	2.9460
Cycle Time Wire Bond (CT _{WB})	seconds	6.0902	-	6.4609
Cycle Time Pre-Cap Inspection (CT _{PC})	seconds	0.9882	-	1.0498
Downtime Duration Die Attach (DD _{DA})	seconds	2141	-	4391
Downtime Duration Wire Bond (DD _{WB})	seconds	1364	-	2797
Downtime Frequency Die Attach (DF _{DA})	minutes	1066	-	2187
Downtime Frequency Wire Bond (DF _{WB})	minutes	1421	-	2193
Setup Time Die Attach (ST _{DA})	seconds	2957	-	6063
Setup Time Wire Bond (ST _{WB})	seconds	1324	-	2714
Batch size (Q)	unit	2200	3080	11264
Cycle Time Oven Cure (CT _{OC})	seconds	7200		

Tabuľka 1 - Rozsah prípustných hodnôt jednotlivých parametrov

3.2 Forma konceptuálneho modelu

Model sa skladá z niekoľkých na sebe nadväzujúcich rovníc, ktorých zdrojom je vyššie spomínaný vedecký článok².

$$O_m = \frac{T_{TOTAL}}{T_{UNIT}} \quad (1)$$

O_m = počet čipov vyrobených za deň [kusy polovodičov]

T_{TOTAL} = dostupný čas za deň [sekundy]

T_{UNIT} = čas spracovania jedného polovodiča [sekundy]

Čas spracovania jednej jednotky je doba spracovania jednej šarže (T_b) vydelená veľkosťou šarže (Q). Doba spracovania jednej šarže (T_b), je celkový čas spracovania, keď všetky úlohy veľkosti dávky Q dokončili spracovanie. T_b bolo získané zberom údajov z 1536 spustených experimentov zhromaždených zo simulačného modelu Pro-Model. Simulačný model¹ [slide 10] je postavený tak, aby reprezentoval integrované procesy montážnej linky polovodičov a parametre procesu z tabuľky 1 sú vložené do modelu na získanie T_b pre každý cyklus. O_m možno teraz vypočítať pomocou rovnice (2).

$$O_m = \frac{T_{TOTAL} \times Q}{T_B} \quad (2)$$

T_B = doba spracovania jednej šarže [sekundy]

Q = veľkosť jednej šarže [kusy polovodičov]

Úplné faktoriálne cykly T_b sa vložili do štatistického softvéru JMP, aby sa vytvoril regresný model. T_b ako funkcia procesných parametrov je znázornená v rovnici (3).

$$\begin{aligned}
 T_B = & 7187.5725 + 387.1239 \frac{CT_{DA} - 2.8766}{0.0694} + 1008.0011 \\
 & \frac{CT_{WB} - 6.2756}{0.1854} + 157.9690 \frac{CT_{PC} - 1.019}{0.0308} + 9.5167 \frac{DD_{DA} - 3266}{1125} \\
 & + 3.9325 \frac{DD_{WB} - 2080.5}{716.5} + 2.4477 \frac{DF_{DA} - 1626.5}{560.5} - 0.1807 \\
 & \frac{DF_{WB} - 1807}{386} - 2.6148 \frac{ST_{DA} - 4510}{1553} + 24.3713 \frac{ST_{WB} - 2019}{695} \\
 & + 10.1729Q \quad (3)
 \end{aligned}$$

Celkový čas dostupný v systéme, T_{total} je zapísaný tak, ako je znázornené v rovnici (4):

$$\begin{aligned}
 T_{TOTAL} = & ((T_D - ST_{DA})(A_{DA}) + (T_D)(1) + (T_D - ST_{WB})(A_{WB}) \\
 & + (T_D)(1)) \times (M) \quad (4)
 \end{aligned}$$

T_D = maximálny čas výroby [sekundy]

ST_{DA} = čas potrebný na nastavenie stroja Die Attach [sekundy]

ST_{WB} = čas potrebný na nastavenie stroja Wire Bond [sekundy]

A_{DA} = dostupnosť stroja Die Attach [sekundy]

A_{WB} = dostupnosť stroja Wire Bond [sekundy]

M = počet dostupných strojov, závislý od procesu v systéme, ktorý má k dispozícii najmenej strojov, teda najmenšiu výrobnú kapacitu

Dostupnosť stroja, A je definované v rovnici (5)

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{86400 - DD_P}{86400} \quad (5)$$

86400 sekúnd = 24 hodín × 60 minút × 60 sekúnd

P = WB (Wire Bond) or DA (Die Attach)

Spojenie rovníc (2), (3), (4) a (5) tvorí výslednú rovnicu na výpočet počtu polovodičov za dobu T_D v polovodičovej fabrike.

$$O_m = \frac{((T_D - ST_{DA}) \left(\frac{86400 - DD_{DA}}{86400} \right) + (T_D)(1) + (T_D - ST_{WB}) \left(\frac{86400 - DD_{WB}}{86400} \right) + (T_D)(1)) \times (M) \times Q}{7187.5725 + 387.1239 \frac{CT_{DA} - 2.8766}{0.0694} + 1008.0011 \frac{CT_{WB} - 6.2756}{0.1854} + 157.9690 \frac{CT_{PC} - 1.019}{0.0308} + 9.5167 \frac{DD_{DA} - 3266}{1125} + 3.9325 \frac{DD_{WB} - 2080.5}{716.5} + 2.4477 \frac{DF_{DA} - 1626.5}{560.5} - 0.1807 \frac{DF_{WB} - 1807}{386} - 2.6148 \frac{ST_{DA} - 4510}{1553} + 24.3713 \frac{ST_{WB} - 2019}{695} + 10.1729Q}$$

Je dôležité si uvedomiť, že parameter M tu zohráva veľkú úlohu, keďže v celkovej rovnici nezáleží na počte jednotlivých strojov, ale iba na počte strojov stroja s najmenšou kapacitou, čo v našom prípade je 3.

4. Architektúra simulačného modelu

Pre lepšiu abstrakciu, bol pri implementácii použitý objektový návrh. Triedy *NormalDistribution* a *ExponentialDistribution*, ako už z názvu vyplýva, generujú náhodné číslo s normálnym, respektíve exponenciálnym rozdelením. V parametroch konštruktora týchto funkcií, nie sú typické hodnoty, ako napr. stredná hodnota, alebo rozptyl. Tieto sa vypočítajú vo vnútri funkcie, aby sa dané rozdelenie dalo interpretovať. Parametrami konštruktora sú minimálna a maximálna hodnota, ktorú má náhodná veličina nadobúdať. Je to kvôli tomu, aby nebolo nutné dáta v *Tabuľke 1* predpripraviť, ale aby bolo možné pracovať priamo s hodnotami v tabuľke. Ďalej, trieda *Factory* abstrahuje prácu celého modelu, a triedna metóda *SimulateTime()* simuluje výrobu vo fabrike za čas T_d .

V programe sa takisto nachádzajú podporné funkcie, ako funkcia na generovanie n tried *Factory*, a funkcie jednotlivých experimentov, kde každý experiment tvorí zvlášť funkciu.

4.1 Mapovanie abstraktného modelu

Vzhľadom na to, že je model popísaný v sekcii 3 je vyjadrený rovnicami, vyskytujú sa tieto rovnice aj v programe. Vo funkcií *SimulateTime()* je načrtnutá hlavná myšlienka finálnej rovnice zo sekcie 3. Najskôr sa vytvoria náhodné čakania, dané príslušnými údajmi v tabuľke a potom sa simuluje beh fabрики za čas T_d . Funkcia vracia počet polovodičov vyrobených za jednotku času.

5. Simulačné experimenty

Cieľom experimentov bolo overiť validitu modelu a následne s daným modelom simulovať veľkosť modelovej fabriky v celosvetovom merítku.

5.1 Postup experimentovania

Keďže hlavným experimentom je validácia modelu, aj postup bol tomu podmienený. K tomu, aby sa validoval model popisovaný v sekcii 3, je nutné sa dopracovať k podobným dátam ako autori modelu. Tento postup bude bližšie popísaný v sekcii 5.2. Následne, keď bude dokázaná validita modelu, je možné nad týmto modelom vykonať experimenty týkajúce sa celkovej produkcie výroby polovodičov vo svete. Na to sú zamerané nasledujúce experimenty.

5.2 Dokumentovanie jednotlivých experimentov

5.2.1 Experiment 1 - Validácia modelu

Validácia modelu je jednou z najkľúčovejších činností pri modelovaní. Preto sa celý jeden experiment venuje práve tejto činnosti. V práci² sa okrem modelu vyskytujú aj ukážkové dáta jednotlivých parametrov (*Tabuľka 2,3,4*). Z týchto dát sa pre každú premennú vypočítala stredná hodnota a smerodajná odchýlka, aby bolo možné tieto dáta porovnať s dátami získanými z tohto modelu. Ďalej bol simulovaný rovnaký počet (21) týchto dát aj modelom z tohto projektu a pre každú premennú boli vypočítané stredná hodnota a smerodajná odchýlka. Porovnanie a rozdiel je vypísaný na štandardný výstup. Pre spustenie iba tejto simulácie je nutné zadať prepínač [-1] (./simulation -1). Výsledky experimentu sú zobrazené na *Obrázku 2*.

Process Variables	Day						
	1	2	3	4	5	6	7
CT _{DA}	2.8346	2.907	2.9342	2.8936	2.9046	2.8971	2.8378
CT _{OC}	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
CT _{WB}	6.1796	6.3721	6.1890	6.3850	6.2920	6.2297	6.2860
CT _{PC}	0.9973	1.0256	1.0200	1.0450	1.0123	1.0150	1.0190
DD _{DA}	2241	3190	2845	3986	4097	3967	2988
DD _{WB}	1599	1987	2366	1822	1769	2544	1479
DF _{DA}	1601	2067	1339	1845	1937	2080	2065
DF _{WB}	1790	1544	1988	1756	2147	2079	1655
ST _{DA}	3867	3099	5427	4635	4906	3782	3056
ST _{WB}	1436	1788	1867	2090	1645	2654	2017
M	3	3	3	3	3	3	3
T _{TOTAL}	994433	992858	979236	980697	981625	980148	993847
Q	3080	2200	11264	2200	2200	3080	11264
O _M	81412	72110	90693	70974	72538	78620	92051

Tabuľka 2- ukážkové hodnoty premenných modelu

Process Variables	Day						
	1	2	3	4	5	6	7
CT _{DA}	2.8432	2.8342	2.9032	2.9178	2.8190	2.8772	2.8100
CT _{OC}	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
CT _{WB}	6.1901	6.2720	6.1126	6.3301	6.1450	6.3021	6.2378
CT _{PC}	1.0079	0.9220	1.0260	1.0348	0.9972	1.0152	1.020
DD _{DA}	3990	4010	3720	2899	2690	2477	3320
DD _{WB}	2265	2740	1608	1790	2011	2390	2700
DF _{DA}	1205	1580	1945	1540	1766	2010	2087
DF _{WB}	1742	1823	2009	1990	2080	1590	1630
ST _{DA}	4932	5109	3550	5742	5230	4480	5020
ST _{WB}	2430	2054	2689	2090	2190	1988	1420
M	3	3	3	3	3	3	3
T _{TOTAL}	975787	975532	984679	977745	979935	984775	981757
Q	11264	3080	3080	11264	2200	2200	3080
O _M	90772	78789	80136	89995	75844	72967	79716

Tabuľka 3- ukážkové hodnoty premenných modelu

Process Variables	Day						
	1	2	3	4	5	6	7
CT _{DA}	2.9328	2.8477	2.8342	2.8146	2.9055	2.8418	2.9181
CT _{OC}	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
CT _{WB}	6.2891	6.3310	6.3187	6.1722	6.1137	6.2671	6.1263
CT _{PC}	1.0199	0.9977	1.0288	0.9880	1.0186	0.9883	1.0078
DD _{DA}	3966	4210	3277	3547	4177	4091	2851
DD _{WB}	2541	1922	2410	2180	2419	2655	2399
DF _{DA}	2019	1579	1368	1392	1752	2180	1611
DF _{WB}	1762	1934	2076	1855	1988	1628	2070
ST _{DA}	5564	5716	4288	4399	4980	5927	3899
ST _{WB}	2613	2561	1762	2611	2701	1677	1577
M	3	3	3	3	3	3	3
T _{TOTAL}	993745	994579	1002224	999328	994918	994747	1005139
Q	2200	11264	11264	3080	3080	11264	2200
O _M	72902	91956	92674	82019	80998	92276	76479

Tabuľka 4- ukážkové hodnoty premenných modelu

```

-----
Experiment 1 - validacia modelu:

Expected CTDA mean: 2.87182      our: 2.87967      diff: 0.00784762
Expected CTDA sd  : 0.0408251    our: 0.0262049   diff: 0.0146202

Expected CTWB mean: 6.24482      our: 6.28081     diff: 0.0359905
Expected CTWB sd  : 0.0819431    our: 0.0902492   diff: 0.00830608

Expected CTPC mean: 1.00983      our: 1.0201      diff: 0.0102667
Expected CTPC sd  : 0.0242871    our: 0.0116411   diff: 0.012646

Expected DDDA mean: 3454.24      our: 2681.67     diff: 772.564
Expected DDDA sd  : 608.898      our: 525.819     diff: 83.0798

Expected DDWB mean: 2171.24      our: 1708.35     diff: 462.889
Expected DDWB sd  : 381.253      our: 334.888     diff: 46.3655

Expected DFDA mean: 1760.38      our: 1290.83     diff: 469.551
Expected DFDA sd  : 285.428      our: 240.759     diff: 44.6692

Expected DFWB mean: 1863.62      our: 1666.03     diff: 197.587
Expected DFWB sd  : 183.705      our: 225.956     diff: 42.2508

Expected STDA mean: 4648         our: 3666.14     diff: 981.865
Expected STDA sd  : 835.14       our: 673.305     diff: 161.835

Expected STWB mean: 2088.57      our: 1681.26     diff: 407.309
Expected STWB sd  : 420.686      our: 330.596     diff: 90.0902

Expected Ttotal mean: 987987     our: 1006835     diff: 18848
Expected Ttotal sd  : 8893       our: 3607        diff: 5286

Expected Om mean: 81710 our: 74326      diff: 7384
Expected Om sd  : 7583  our: 1570      diff: 6013
-----

```

Obrázok 2 - výsledky experimentu 1

5.2.2 Experiment 2 - Koľko modelových fabriek je potrebných na to, aby zabezpečili výrobu za rok 2021?

Tento experiment má znázorniť veľkosť modelovej fabriky k svetovému merítku. Z porovnania fabriek⁷ je badateľné, že modelová fabrika sa radí k tým menším. A týmto experimentom bolo zámerom ukázať, aké by bolo absurdné, keby na svete existovali iba tak malé fabriky akou je tá modelová. Z ďalšieho zdroja⁴ bolo zistené, že za rok 2021 sa predpokladá 1,14 trilióna dodaných polovodičov. V programe je simuláciou zisťovaný počet modelových fabriek, ktoré uspokojujú túto hodnotu. Keďže sú dáta zo simulácie kolísavé, je výpočet spustený 10 ráz a výsledky sú následne spriemerované. Výsledok tohto experimentu je vypísaný na štandardný výstup. Pre spustenie iba tejto simulácie je nutné zadať prepínač [-2] (./simulation -2). Výpočet je trochu zdĺhavejší, preto je nutné nechať program bežať pár sekúnd. Výsledky experimentu sú zobrazené na Obrázku 3.

```
.....
Experiment 2 - kolko modelovych fabrik je treba na to aby zabezpecili vyrobu za rok 2021:
1.14 trilion polovodicov vyrobi 37900 modelovych fabrik za rok.
.....
```

Obrázok 3 - výsledky experimentu 2

5.2.3 Experiment 3 - Koľko je potrebné vybudovať modelových fabrik ročne na to, aby produkcia stíhala predpokladanému rastu výroby ?

Za posledných 20 rokov bol priemerný nárast polovodičov za rok 6,25%⁴. Za predpokladu, že modelové fabriky z experimentu 2 pracujú v 100% vyťažení, by bolo nutné každý rok vybudovať nové fabriky. Preto v tomto experimente simulujeme počet fabrik, ktoré by sa najbližších 5 rokov ročne museli vystavať, aby bol uspokojený iba prirodzený nárast počtu polovodičov po ktorých je dopyt. Výsledok tohto experimentu je vypísaný na štandardný výstup. Pre spustenie iba tejto simulácie je nutné zadať prepínač [-3] (./simulation -3). Výpočet je trochu zdĺhavejší, preto je nutné nechať program bežať pár sekúnd. Výsledky experimentu sú zobrazené na Obrázku 4.

```
.....
Experiment 3 - kolko je treba vybudovat modelovych fabrik rocne aby to stacilo prirodzenemu rastu vyroby (6.25%):
po 1 rokoch, pocet fabrik potrebny vybudovat aby sa stihala vyroba:2280
po 2 rokoch, pocet fabrik potrebny vybudovat aby sa stihala vyroba:2600
po 3 rokoch, pocet fabrik potrebny vybudovat aby sa stihala vyroba:2480
po 4 rokoch, pocet fabrik potrebny vybudovat aby sa stihala vyroba:2420
po 5 rokoch, pocet fabrik potrebny vybudovat aby sa stihala vyroba:2385
.....
```

Obrázok 4 - výsledky experimentu 3

5.3 Zhodnotenie/závery experimentov

5.3.1 Experiment 1

Z výsledkov môžeme povedať, že model je s najväčšou pravdepodobnosťou validný. Štatistiky premenných, ktoré majú mať hodnoty normálneho rozloženia (CTwb, CTda, CTpc) sú skoro totožné s našim generovaním. U štatistík premenných, ktoré majú mať exponenciálne rozloženie je určitý rozdiel, ale môže byť spôsobený tým, že 21 vzoriek je príliš málo na to, aby sa preukázala vlastnosť exponenciálneho rozloženia. U premenných T_{total} a 0_m sú hodnoty taktiež porovnateľné. Rozdiely môžu byť znásobením rozdielov u premenných s exponenciálnym rozdelením. Ale výsledný počet vyrobených polovodičov, odpovedá reálnej malej až stredne veľkej fabrike. Preto môžeme model považovať za validný.

5.3.2 Experiment 2

Výsledkom tohto experimentu je síce iba jedno číslo, ale tento údaj toho vie veľa povedať. Viac ako 35 000 takýchto tovární by muselo existovať, aby pokryli aktuálnu kapacitu výroby polovodičov. Z dát⁷ vieme, že reálny počet fabrik je markantne nižší. Z tohto rozdielu je jasne vidieť, že veľké továrne majú omnoho viac výhod ako tie malé. Réžia spojená s malými továrňami je príliš veľká na to, aby takéto riešenie fungovalo. Preto hovoríme v súvislosti s firmami, ktoré vyrábajú polovodiče skoro o monopole, lebo je problém

pre menšie firmy zapojiť sa do výroby tak, aby to prinieslo potrebné viditeľné výsledky. Teda riešenia polovodičovej krízy, ako napr. každý štát by si mohol vybudovať vlastnú továreň, nepripadajú do úvahy.

5.3.3 Experiment 3

Tento experiment dopĺňa závery experimentu 2. Vyplýva totiž, že ročne by bolo nutné vytvoriť a spustiť viac než 2000 nových fabrík a to je nemysliteľné. Je zrejmé, že dopyt po polovodičoch neustále rastie, a je možné, že každoročný nárast bude ešte väčší než historických 6,25%. Toto ešte viac prispieva k záveru, že dostavanie takého obrovského počtu fabrík každoročne neprichádza do úvahy. Preto je jasné, že nestačí budovanie nových fabrík, ale je veľmi dôležité prehodnotiť možnosť budovania fabrík s väčšou kapacitou, aby bolo možné nielen potenciálne dobehnúť aktuálny nedostatok, ale takisto predísť podobnej situácii v budúcnosti.

6. Zhrnutie simulačných experimentov a záver

Na základe vykonaných experimentov je možné vyvodiť niekoľko záverov týkajúcich sa aktuálnej situácie nedostatku polovodičov. V prvom rade výsledky experimentov podporili validitu modelu menšej fabriky. Vďaka tomu bolo možné vykonať nasledujúce experimenty, ktoré sa zamerali na porovnanie modelovej fabriky ku zvyšku sveta.

Z druhého experimentu je možné jednoznačne vyvodiť záver, že fabriky s malou výrobnou kapacitou neponúkajú to čo sa v dnešnej dobe očakáva od výrobcov a je jasne vidieť, že budovanie malých fabrík nie je riešenie pre súčasnú situáciu.

Spomedzi aktuálne vyrábajúcich fabrík s podobnou výrobnou kapacitou ako je modelová, náklady⁷ na výstavbu tej najlacnejšej boli 0.140 miliárd amerických dolárov. Pre porovnanie, ceny najlacnejších fabrík s desaťnásobnou kapacitou od tej modelovej boli vybudované za najmenej 2 miliardy. Z pohľadu financií je budovanie fabrík s menšou kapacitou vhodnejšie riešenie, ale práve kvôli výsledkom tohto experimentu je zrejmé, že v tomto prípade nie je žiaduce obetovať rozpočet na úkor výrobnnej kapacity fabriky.

Z aktuálnej situácie nedostatku polovodičov na trhu je možné predpokladať, že trend rastu dopytu po polovodičoch bude pokračovať aj v najbližších rokoch. Na základe tohto predpokladu bol vykonaný tretí experiment. Z jeho výsledkov vyplýva, že takisto ako pri predchádzajúcom experimente, budovanie nízkokapacitných fabrík je neefektívnym riešením z dlhodobého hľadiska. Počet modelových fabrík, ktoré by bolo potrebné ročne vybudovať, je príliš veľký na to, aby toto riešenie bolo udržateľné. Výsledky experimentov vykonaných v tejto práci poukazujú na to, že budovanie fabrík s podobnou výrobnou kapacitou akej je schopná modelová fabrika nie je efektívnym riešením na boj proti polovodičovej kríze.

7. Zdroje

1. PERINGER, P. & HRUBÝ, M. Modelování a simulace. *Text k přednáškám kurzu Modelování a simulace na VUT FIT v Brně*. [online] 20.9.2021 [cit. 5.12. 2021]. Dostupné z: <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php.cs?file=%2Fcourse%2FIMS-IT%2Flectures%2FIMS-2021-09-20.pdf&cid=14664>
2. HOE, H.K. PRAKASH, J. KAMARUDDIN, S. & SENG, O.K. (2019). An integrated model for adjustment of process parameters to recover throughput shortage in semiconductor assembly: A case study. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(2), 340-355. [cit. 5.12.2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3926/jiem.2742>
3. DASHVEENJIT, K. Here's what the 2021 semiconductor shortage is all about. *Tech Wire Asia*. [online] 13.10.2021 [cit. 5.12.2021]. Dostupné z: <https://techwireasia.com/2021/10/heres-what-the-2021-global-semiconductor-shortage-is-all-about/>
4. ALSOP, T. Semiconductor unit shipments worldwide from 2000 to 2021. *Statista*. [online] 12.11.2021 [cit. 5.12.2021]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/802632/world-semiconductor-shipments/?fbclid=IwAR1tINJVVfm452ivZ9ELi-ljP2XMwschb61HfwOoKBR33a0r1Xae907sdJY>
5. Cplusplus.com. cplusplus.com – C++ Resources Network. [online] ©2000-2021 *cplusplus.com* [cit. 5.12. 2021]. Dostupné z: <http://www.cplusplus.com>
6. GNU Make. GNU Operating System. [online] © 2007 *Free Software Foundation, Inc.* [cit. 5.12.2021]. Dostupné z: <https://www.gnu.org/software/make/?fbclid=IwAR0tC290Pe3qKPXcPTIZ65llvLb50gAmLU8CFKiv1MF9sOuXmIOfSld0SZM>
7. WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. List of semiconductor fabrication plants. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [online] 25.11.2021 [cit. 5.12. 2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_semiconductor_fabrication_plants&oldid=1057120587