

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## Fakulta informačních technologií

### Simulační studie (T4)

Analýza a optimalizace kalibrační laboratoře energetické společnosti

2. prosince 2024

Marek Effenberger (xeffen00)  
Adam Valík (xvalik05)

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
1.1	Autoři a zdroje . . . . .	3
1.2	Validita modelu . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Rozbor tématu a použitých metod/technologií</b>	<b>4</b>
2.1	Popis použitých postupů . . . . .	5
2.2	Použité metody/technologie . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Koncepce - modelářská témata</b>	<b>5</b>
3.1	Hlavní prvky modelu . . . . .	5
3.2	Modelované procesy a vazby . . . . .	6
3.3	Vizuální reprezentace konceptuálního modelu . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Architektura simulačního modelu</b>	<b>9</b>
4.1	Mapování konceptuálního modelu do simulačního modelu . . . . .	10
4.2	Spuštění simulačních experimentů . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Podstata simulačních experimentů a jejich průběh</b>	<b>11</b>
5.1	Běžný chod laboratoře bez automatizace . . . . .	12
5.2	Vyšší podíl prioritních zakázek bez automatizace . . . . .	13
5.3	Zvýšený přísun zakázek bez automatizace . . . . .	14
5.4	Běžný chod laboratoře s automatizací . . . . .	15
5.5	Vyšší podíl prioritních zakázek s automatizací . . . . .	16
5.6	Zvýšený přísun zakázek s automatizací . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Shrnutí simulačních experimentů a závěr</b>	<b>18</b>

# 1 Úvod

Kalibrační laboratoře energetických společností zajišťují ověření validity měření a kalibrace přístrojů, jako jsou multimetry, oscilátory a analyzátory kvality sítě. Tyto laboratoře mají klíčovou roli při zajišťování přesnosti a spolehlivosti měřicích technik, což ovlivňuje kvalitu služeb poskytovaných dodavateli energií. Frekvence kalibrace přístrojů je určována vnitřními normami jednotlivých společností, přičemž laboratoře také poskytují své služby externím subjektům.

Cílem této práce je analyzovat a optimalizovat stávající systém kalibrační laboratoře, identifikovat jeho slabá místa, která se objevují s rostoucím počtem zakázek a komplexností jejich kalibrace. Tyto faktory mohou zpomalovat provoz, zvyšovat náklady a snižovat spokojenost zákazníků. Součástí práce bude návrh optimalizace systému zavedením externisty, který se bude podílet na vývoji automatizačních programů pro rychlejší zpracování zakázek. Kombinace analýzy chybovosti laboratoře, potenciálu automatizace a vytíženosti zdrojů a zaměstnanců umožní vytvoření komplexního pohledu na efektivitu a fungování laboratoře.

## 1.1 Autoři a zdroje

Projekt byl vypracován studenty Markem Effenbergerem a Adamem Valíkem zapsanými v třetím ročníku bakalářského studia na FIT VUT v Brně.

Základ znalostí o modelování a simulacích plyne z kurzu IMS - Modelování a simulace [6]. Přibližné časy kalibrace a simplifikace metodiky kalibrace vycházejí především z vlastní zkušenosti jednoho z autorů práce, který byl zaměstnán v kalibrační laboratoři dodavatelské společnosti EG.D. Data, jež autorům nebyla známa, byla určena na základě aproximace dostupných dat, jako například: data korelující s výskytem prioritních zakázek [5], data korelující s rekalisačními protokoly [3, 12, 7] a v neposlední řadě data vyzdvihující důležitost automatizace vůči efektivitě a snížení chybovosti [8].

## 1.2 Validita modelu

Ověřování validity modelu [10](str. 37) probíhalo za spuštění několika experimentů nad simulačním modelem [10](str. 44), jehož výsledky byly porovnávány s pozorováním skutečných délek kalibrací. Mnohá veřejně dostupná data týkající se vlivu automatizace na kalibrační procesy pocházejí od dodavatelů zařízení a software, což může vést k tendenci extrémních hodnot na spektru, jež je třeba vzít v úvahu při interpretaci výsledků. Cílem modelu není však polemizovat s těmito daty, ale poskytnout nástroj pro identifikaci slabých míst v konkrétních scénářích v rámci kalibrační laboratoře.

## 2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

V České republice je k datu psaní této studie 136 akreditovaných kalibračních laboratoří [15]. Tyto laboratoře podléhají normám, jako je ČSN EN ISO/IEC 17025:2018 [16]. Normy určují kompetenci dané laboratoře a zajišťují jejich nestranné a nezávislé fungování. Laboratoř disponuje vlastními referenčními přístroji a stanovuje si na jejich základě rozsah akreditace - tedy jaké rozsahy a veličiny je schopna kalibrovat. Tento rozsah je pak schválen akreditačním orgánem. Referenční přístroje podléhají mezinárodním etalonům a samy musí být periodicky kontrolovány a kalibrovány a jejich chyba musí odpovídat specifikaci.

Kalibrační laboratoře na základě smluv poskytují své služby a zajišťují přesnost měřících přístrojů ze zakázek. Mezi kalibrované přístroje nejčastěji patří multimetry a osciloskopy. Vzhledem k popisu práce v kalibrační laboratoři, která je součástí dodavatele energií, pak také zajišťuje specifikaci i složitějších přístrojů, jako jsou analyzátory kvality sítě nebo odporové dekády, u nichž se neměří specifikace proudů. Mezi obvyklé kalibrace patří specifikace střídavých a stejnosměrných proudů a napětí, měření odporů, základních a harmonických frekvencí a flickerů. Laboratoř operuje se zařízeními jednofázovými i třífázovými.



Obrázek 1: Příklad přesného referenčního multimetru Keysight 3458A

Laboratoř musí přizpůsobit své zdroje konkrétní zakázce. Potřebná přesnost měření se vyjadřuje v jednotkách ppm (*parts per milion*), což je relativní veličina vyjadřující miliontinu dané pozorované hodnoty. Vzhledem k tomu, že referenční přístroje jsou nákladné a samy podléhají pravidelné údržbě, tak laboratoře nedisponují neomezenými zdroji. Zároveň zaměstnanci musí často zvolit kombinaci různých referenčních přístrojů vzhledem k relativním přesnostem u různých veličin. Platí, že čím vyšší přesnost měření a schopnosti referenčního stroje, tím vyšší náklady na jeho pořízení a údržbu, což se projevuje jejich nižším počtem ve vlastnictví laboratoře.

Samotní zaměstnanci patří do více skupin kompetence dle vlastního elektrotechnického oprávnění v souladu s paragrafy § 19 a § 11 zákona č. 250/2021 Sb. se splněním požadavků na jejich způsobilost podle nařízení vlády č. 194/2022 Sb. [4]. Vedoucí kalibrační laboratoře by měl mít stupeň způsobilosti minimálně 7, zaměstnanci stupeň 6. Vedoucí po kalibraci musí vydat kalibrační listinu daného zařízení, kde ukazuje relativní chybu naměřenou při kalibraci a porovnání se specifikací přístroje.

Měření zařízení podléhá lidskému faktoru a možné chybě u měření. Jedná se především o kalibraci proudů. Chyby mohou vznikat například rozdílnými maximálními rozsahy u kalibrovaného a referenčního přístroje, kdy člověk chybně předpokládá rozsah stejný a pustí na vstup přístroje takový proud, který neodpovídá elektrotechnické specifikaci. Tato porucha pak zapříčiní prodlevu opravy a justifikace dle specifikace daného zařízení a následnou rekalibraci. Je také nenulová šance, že chybnou manipulací zaměstnanec poškodí přístroje oba.

Kalibrace podléhá různému druhu závažnosti chyb při měření. Chyby se mohou odvíjet od např. chybného vestavěného software zařízení (špatná syntax SCPI příkazů), nebo špatné manipulace s pojíci kabely. Existuje však i pravděpodobnost, že chyba vznikne při generaci příliš vysokých proudů, které zaviní poškození vnitřních komponent. Zařízení pak musí být opraveno výrobcem, v nejhorším případě nahrazena.

Práce externisty je určena tvorbou automatizačního software kalibrace. Přístroje, ať už referenční, nebo kalibrované, jsou ovladatelné pomocí SCPI příkazů [13]. Příkazy každopádně nejsou standardizované napříč zařízeními a externista musí pro daný model přístroje, který ještě nekalibroval, vyvinout kalibrační software na míru. Automatizační software pak umožňuje urychlení procesu kalibrace.

Poslední nedílnou součástí je priorita zakázek kalibrační laboratoře. Vedoucí laboratoře určuje prioritu zakázek s tím, že zakázky spadají do dvou kategorií. První jsou zakázky standardní priority, které zahrnují zaslání zařízení na periodickou kontrolu. Druhými jsou zakázky prioritní, které vyplývají z potřeb dodavatele společnosti. Tyto přednostní požadavky reprezentují např. analyzátory kvality sítě, kterých přesnost je zpochybněna koncovým zákazníkem dodavatelské společnosti a zákonně musí být ověřena přesnost dat, které poskytují. Šance na vznik takové přednostní zakázky je nízká, avšak není zanedbatelná.

## 2.1 Popis použitých postupů

K dosažení cíle této simulační studie bylo využito modelování [10](str. 8) systému hromadné obsluhy (SHO) [10](str. 139). Formálně je tento model popsán Petriho sítí [10](str. 126). Díky jejich schopnosti modelování paralelních procesů je to pro SHO vhodný postup. Tím jsme zachytili dynamiku procesů v laboratoři. Tento abstraktní model [10](str. 10) byl dále přepsán do kódu na simulační model [10](str. 44). Ten pak, podložen daty z reálného provozu laboratoře, byl použit k simulacím [10](str. 8) a ukázce vývoji systému za různých okolností. Výsledky experimentování vedly k formulaci návrhu na zlepšení systému.

## 2.2 Použité metody/technologie

K vytvoření simulačního modelu byl využit programovací jazyk C++ [2] a simulační knihovna SIMLIB [11], která mimo jiné nabízí funkce pro modelování front a zdrojů s omezenou kapacitou. Pro překlad zdrojových souborů byl využit nástroj GNU Make [9] a překladač g++ [1].

# 3 Koncepce - modelářská témata

Konceptuální model [10](str. 48) slouží jako abstrakce reality popsané v 2. Data zmiňována v tomto textu korelují s typickým vytížením laboratoře na základě osobního pozorování a aproximace dat ze zmiňovaných zdrojů. Model se soustředí na klíčové procesy a přicházející požadavky včetně jejich obsluhy a možných výpadků se zaměřením na optimalizaci provozu laboratoře externistou. Popisuje kalibrační laboratoř energetické společnosti akreditovanou v 90% rozsahu. Jelikož nové zakázky nepřichází, ani nejsou obsluhovány mimo pracovní dobu laboratoře, nemusíme ji v modelu uvažovat.

## 3.1 Hlavní prvky modelu

- **Zakázky:** Zakázky představují vstupní požadavky laboratoře na kalibraci měřících přístrojů. Každá zakázka může spadat do jedné ze dvou priorit:
  - **Standardní zakázky:** Chodí jak od soukromníků, tak od dodavatelské společnosti a jedná se zpravidla o periodické kontroly.
  - **Prioritní zakázky:** Zakázky vyplývající z potřeb dodavatele energie, například soudní spory s klienty, kde je nutné přednostně ověřit přesnost dat. Jejich podíl v systému vychází z aproximace počtu soudních řízení s dodavatelskými společnostmi [5].

Kalibrace přístroje zakázky je komplexní proces a doba se odvíjí od potřeb uživatele zařízení (různé využití vyžaduje například vyšší počet odměrů na specifických rozsazích). Vzhledem k nutným prodlevám, které přístroje vyžadují pro korektní měření dat z detailů specifikace, se pro celkový rozsah veškerých měřených

veličin zařízení kalibruje dobu danou exponenciálním rozložením [10](str. 91) se středem 14 hodin. Tato doba vychází z osobního pozorování kalibrace různých přístrojů.

- **Referenční přístroje:** Přístroje používané jako referenční etalony pro kalibrace. Zakázky vyžadující přísnější specifikací výrobce mohou ke kalibraci vyžadovat referenční zařízení s vyšší přesností a těch je menší počet. Referenční přístroje podléhají periodické kalibraci a údržbě co 2 roky, což ovlivňuje jejich dostupnost (kalibrace referenčního přístroje zabere zhruba 4 dny). Mezi referenční zařízení s nižší přesností se řadí multimetry užívané k typické kalibraci, těch očekáváme v menší kalibrační laboratoři přibližně 10. Referenční zařízení, označována jako přesnější, v systému figurují 2. Toto číslo abstrahuje různé specifické formy kalibrace, které v pracovním rozpoložení laboratoře nefigurují tak často (např. vysoce přesné multimetry, měření velmi vysokých hodnot, apod.).
- **Pracovníci:** Zaměstnanci laboratoře provádějí kalibrace podle svého elektrotechnického oprávnění. Model zahrnuje:
  - 1 vedoucího laboratoře (skupina 7): Schvaluje a vydává výstupní kalibrační listy, provádí kalibrace.
  - 3 pracovníky (skupina 6): Provádějí kalibrace a manipulaci s referenčními přístroji.
  - 1 externistu (skupina 4): Vyvíjí automatizační software.
- **Automatizační procesy:** Automatizační software zkracuje dobu zpracování zakázky na dobu danou exponenciálním rozložením se středem 8 hodin. Laboratoř disponuje základní databází skriptů k automatizaci, která nastavuje pravděpodobnost možnosti použití software k urychlení kalibrace na 20%. Vývoj automatizačních software externistou rozšiřuje portfolio programů v databázi a tuto pravděpodobnost zvyšuje.
- **Chyby a výpadky:** Měření může být ovlivněno technickými problémy s přístroji nebo lidskou chybou, což v modelu figuruje pravděpodobnostním vyjádřením na základě odhadu inspirovaným THERP metodologií vzhledem k jejich opravitelnosti a nízkému stresovému faktoru práce [14]. Pravděpodobnost chyby při zpracování zakázky je stanovena na 5% aproximací z podstaty nedeterminizovatelnosti předpovědi lidské chyby. Při malé chybě neočekáváme narušení procesu kalibrace, pouze prodloužení doby zpracování zakázky o dobu danou exponenciálním rozložením se středem 1 hodina (doba zahrnuje opravu jednoho přístroje). Při vážnější chybě, která může vést k poškození hardware zařízení a nutnosti opravy výrobcem, se dělí chování systému na tři větve. V případě vážného poškození referenčního přístroje zařízení odchází na opravu výrobcem, případně na výměnu za kus nový. Tento proces zaviní nedostupnost referenčního přístroje po dobu přibližně 7 dní a zakázka musí být kalibrována od začátku, je však vyřízena přednostně. V případě poškození zařízení kalibrovaného je zařízení odstraněno ze systému a odchází na opravu (spojenou s korektní kalibrací) k výrobcu. Poškození obou zařízení vede ke kombinaci zmíněných scénářů a nastává v 10% případech. Pravděpodobnost poškození přístroje referenčního, nebo přístroje zakázky je stejná.

### 3.2 Modelované procesy a vazby

- **Příjem standardních zakázek:** Oznámení standardních zakázek přicházejí průměrně 2 denně. zakázky jsou oznámeny vedoucí a vzhledem k tomu, že laboratoř přijímá zakázky i od soukromých orgánů, se může stát, že laboratoř na jejich kalibraci není akreditovaná a zakázku musí odmítnout. Zakázky mohou být též odmítnuty, pokud je laboratoř mimořádně vytížena (v laboratoři čeká více než 20 zakázek na zpracování). Po určitém časovém intervalu jsou zakázky fyzicky přijaty na kalibraci.
- **Příjem prioritních zakázek:** Prioritní zakázky jsou přijímány do systému vždy a jejich vyřizování probíhá stejným způsobem, však s vyšší prioritou (jsou řazeny před standardní zakázky).

- **Kalibrace přístrojů:** Proces kalibrace si žádá dostupnost pracovníka a referenčního přístroje. Kalibraci provádí všichni zaměstnanci s dostatečným elektrotechnickým oprávněním - vedoucí i pracovníci, přičemž přednostně pracovníci, jelikož vedoucí prioritně vypisuje a schvaluje výstupní kalibrační listy. Zakázky se dělí do skupin dle přesnosti měření - k oběma úrovním přesností má laboratoř k dispozici odpovídající počet referenčních přístrojů.

Kalibrační laboratoř disponuje databází automatizačních skriptů pro urychlení kalibrace.

- Pokud existuje automatizační proces, kalibrace je urychlena.
- Pokud proces neexistuje, kalibrace je pomalejší - přístroje kalibrují ručně.

V obou případech zůstává přibližně stejná možnost lidské chyby u měření. Tato chyba totiž vzniká jako důsledek špatně zadaných hodnot (ať už rozsahových u referenčních multimetrů, tak i hodnot amplitudy generovaného signálu), případně při nesprávném zapojení spojovacích kabelů.

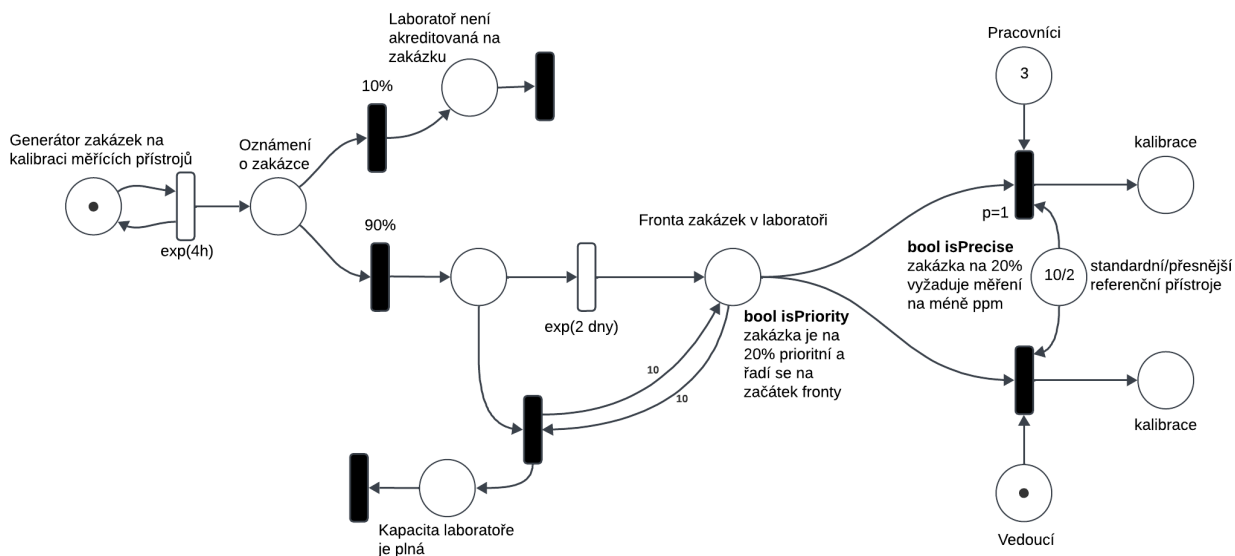
- **Vliv externisty na optimalizaci chodu laboratoře:** Externistovou prací je rozšiřovat portfolio automatizačních programů vývojem software pro přicházející zakázky a urychlit tak proces jejich kalibrace. Externista, pokud nepracuje na vývoji programu, je notifikovaný o přijetí nové zakázky. Pokud pro ni neexistuje vyvinutý software, začne pracovat na vývoji. Po vyvinutí software je kalibrace urychlena a rozšířena databáze vlastněných skriptů. Kdyby zakázka čekala na vývin software příliš dlouho, je externistovi odebrána a zkalibrována manuálně.

### 3.3 Vizuální reprezentace konceptuálního modelu

V této sekci představujeme vizuální reprezentaci konceptuálního modelu pomocí Petriho sítě. Tato síť je rozdělena do tří funkčních celků a doplněna o komentáře upravující její specifika.

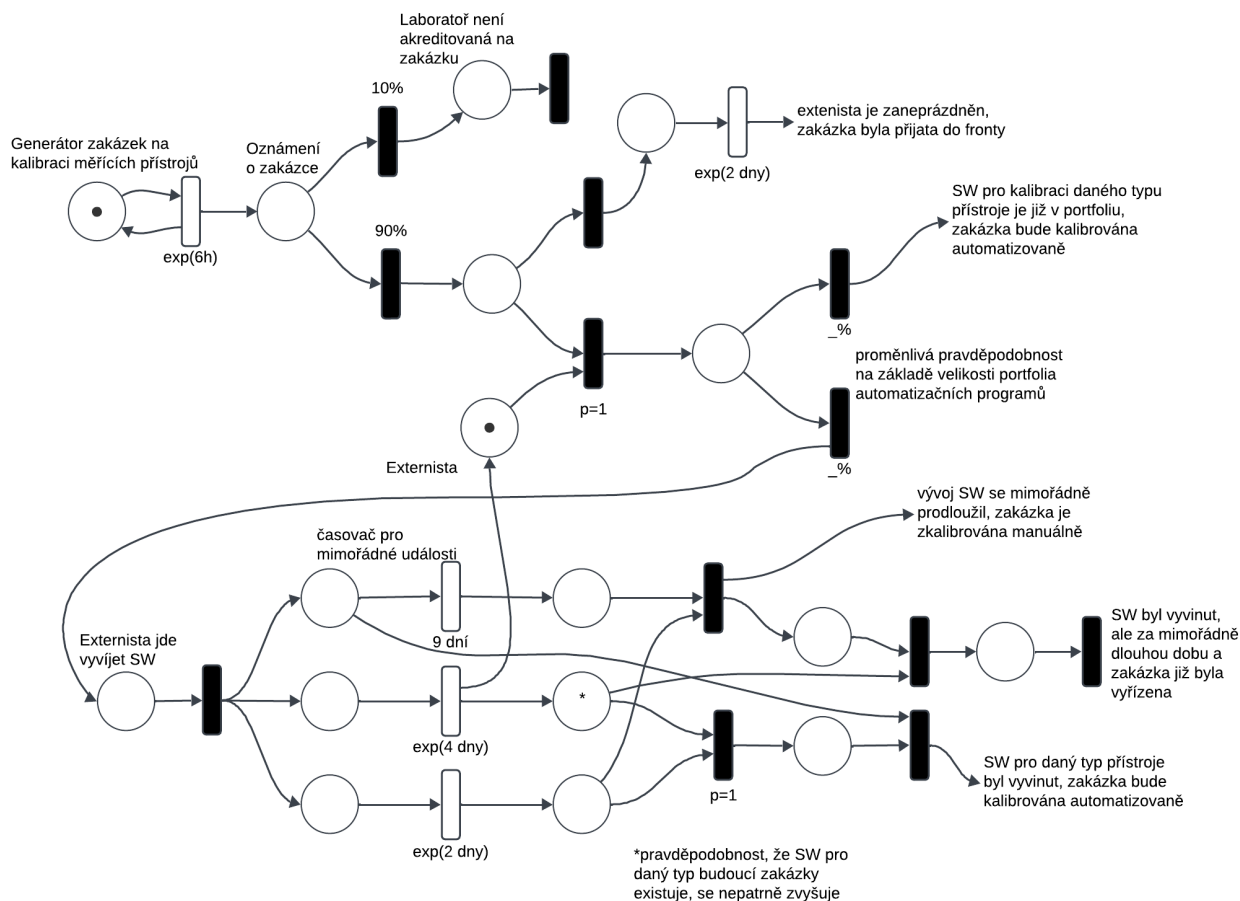
#### 3.3.1 Vstup zakázky do systému

zakázka je oznámena a v daném pravděpodobnostním rozložení odmítnuta (z kapacitních důvodů, nebo kvůli nedostatečné akreditaci). Ve většině případů laboratoř však potvrdí příjem zakázky a čeká na její přijetí (prioritní zakázky jsou přijaty vždy). zakázky jsou zpracovávány dle priority. Podle nutnosti precizního měření čeká na obsluhu zaměstnancem příslušným referenčním přístrojem.



### 3.3.2 Zavedení externisty do systému

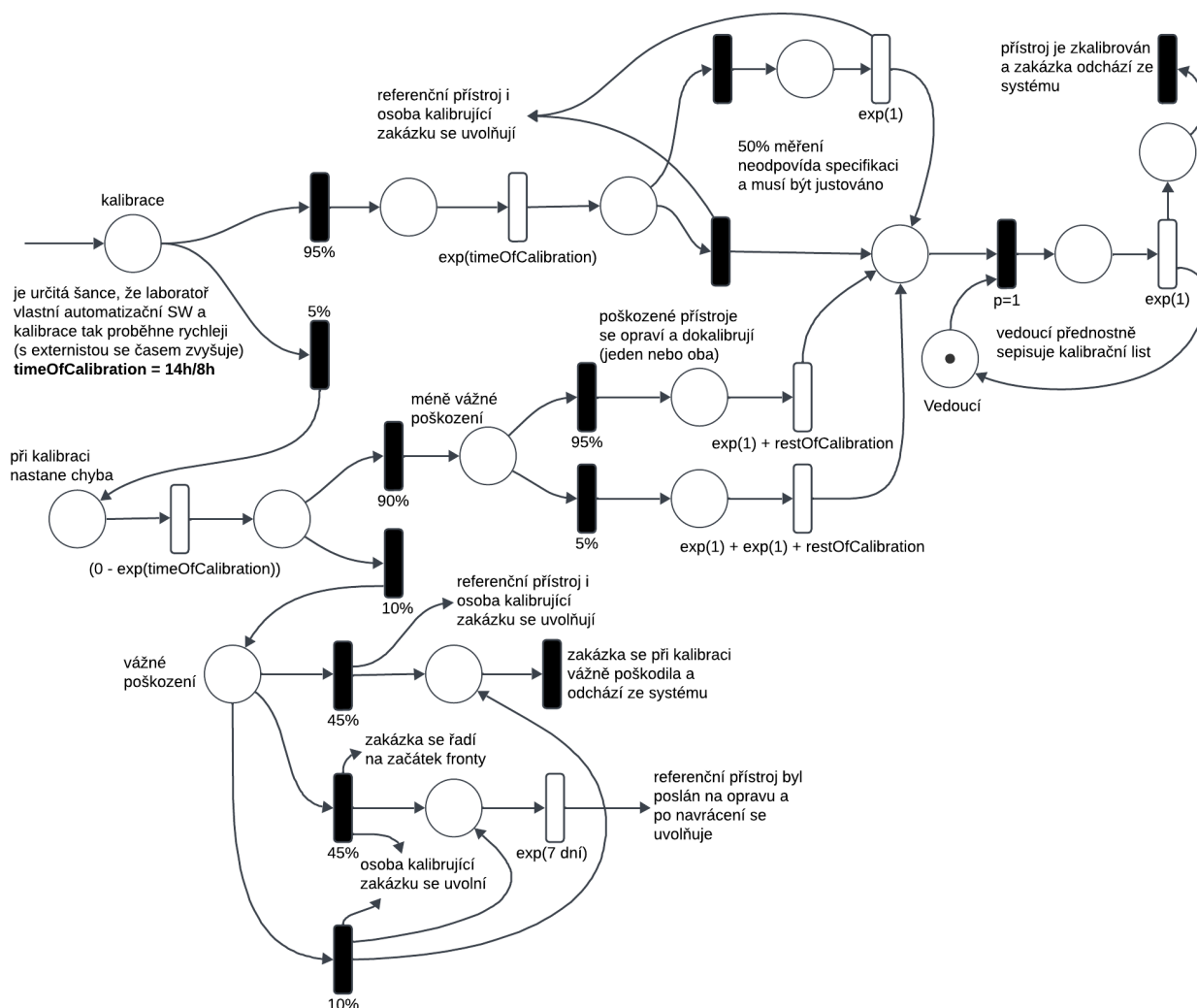
Tento diagram slouží pro popis vlivu externisty na chod systému. Externista, za předpokladu, že nemá pro přístroj vyvinutý software a je dostupný, začne na software pracovat. zakázka v mezičase přijde do laboratoře a po dokončení vývoje software je zkalibrována rychleji. V případě, že by na vývoj software zakázka čekala příliš dlouho, je po určité době převedena na manuální kalibraci.





### 3.3.3 Proces kalibrace a možnost chyby

Poslední část Petriho sítě pak znázorňuje proces samotné kalibrace a vliv vzniku chyb při měření. Po dokončení kalibrace je přístroj případně justován a poté vedoucí laboratoře vypisuje kalibrační listinu.



## 4 Architektura simulačního modelu

Simulační model kalibrační laboratoře je navržen na základě diskrétní simulace procesů. Diskrétní časové kroky se zde počítají po hodinách, přičemž jeden den je reprezentovaný jako 8 hodin znázorňujících pracovní dobu, jelikož, jakožto abstrakce reality, mimo pracovní dobu je laboratoř zavřena a nové zakázky nechodí. Pro simulaci pak dává smysl použít počet hodin pro reprezentaci roků. Jednotlivé entity představují zakázky a rekaliibrace (procesy, jež jsou strukturovány do jednotlivých tříd), zdroje jako pracovníci, externisté, vedoucí nebo referenční zařízení (Facility nebo Store) a fronty pro řízení přístupu ke zdrojům (Queue). Klíčovou myšlenkou modelu je simulace toku zakázek, jejich prioritizace, zpracování a vliv výpadků zařízení nebo chyb na proces.

Zakázky se generují s určitými pravděpodobnostmi pro prioritu, potřebu přesnějšího referenčního zařízení a existenci automatizace. Simulace sleduje jejich průchod laboratoří. Pakliže se stane, že oznámení o neprioritní zakázce je odmítnuto, odchází ze systému a zaznamenává se statistika o odmítnutých zakázkách.

Simulační model je dále koncipován jednoduchým přepnutím přítomnosti či nepřítomnosti externisty v systému. Pakliže externista do systému zaveden je, svým působením po malých částech inkrementuje hodnotu pravděpodobnosti existence software pro nově příchozí zakázku. Tato hodnota však nemůže přesáhnout 75%, což zohledňuje realitu přibývání nových typů zařízení a kalibraci zařízení bez větší možnosti automatizace.

Hlavním chodem programu je zpracování kalibrace, řešení chyb a výsledné statistiky. Kalibrační proces zahrnuje sekvenční kroky jako přidělení pracovníka (nebo zařazení dle priority do fronty, pakliže pracovník není k dostání), použití referenčního zařízení, kalibraci a případné řešení chyb nebo selhání. To se odehrává na základě přepínání chodu programu dle pravděpodobností a pozastavování procesů čekáním, což simuluje průběh činností.

Dojde-li k vážnému poškození referenčního zařízení, vedlejší proces reprezentující opravu referenčního zařízení si tento zdroj zabere na potřebnou dobu, což modeluje nedostupnost zařízení v systému.

Průběh programu je řízen nadefinovanými konstantami, které jsou odvozeny ze zdrojů, osobní zkušenosti a jsou více popsány v 3. Pro možnosti experimentování se simulačním modelem lze tyto konstaty, včetně příznaku přítomnosti externisty v systému, nastavovat v souboru `Constants.h`.

## 4.1 Mapování konceptuálního modelu do simulačního modelu

### Procesy

- **Order:** Třída `Order` reprezentuje jednotlivé zakázky. Její chování zahrnuje zabírání zdrojů, zpracování externistou, kalibraci a řešení chyb.
- **Recalibration:** Třída `Recalibration` modeluje pravidelnou kalibraci referenčních zařízení.
- **ReferenceDeviceFailure:** Řeší zabránění zdrojů referenčního přístroje, který byl vážně poškozen a musí se zaslat výrobci na opravu/výměnu.
- **SWDevelopment:** Obstarává situaci, kdy se vývoj software mimořádně protáhl, překonal limit čekání zakázky a proces zakázky byl přesunut k manuálnímu zpracování, avšak externista musí tento software dodělat.

### Zdroje

- **Facility:** `Manager` a `Externist`. Zdroje, reprezentující vedoucího a externistu, kteří fungují jednotlivě a jsou schopni prioritního přístupu.
- **Store:** `Workers`, `PreciseRefDev` a `UnpreciseRefDev`. Omezené zdroje s řízením přístupu. Reprezentovány počtem pracovníků, přesných a méně přesných referenčních zařízení.

### Fronty

- **OrderQueue:** Fronta zakázek v systému, které čekají na zpracování. Prioritní zakázka je zde řazena za poslední prioritní zakázku před zakázky neprioritní. Zakázka, při jejíž kalibraci byl vážně poškozen referenční přístroj a potřebuje proces kalibrace zopakovat, je řazena na začátek fronty.
- **ManagerQueue:** Fronta zakázek, které byly zkalibrovány a čekají na vedoucího, který vypisuje kalibrační listy.

### Generátory

- **OrderGenerator:** Aktivuje proces `Order`. V jeho konstruktoru nastavuje parametry dané zakázky na základě nastavených pravděpodobností.

- **RecalibrationGenerator:** Aktivuje proces `Recalibration`. Pravidelnost vytváření nových recalibrací se odvíjí od počtu referenčních přístrojů v systému a faktu, že podléhají periodické recalibraci co 2 roky:

$$(2 * 8 * 365) / ((\text{numPreciseRefDev}) + (\text{numUnpreciseRefDev}))$$

**Statistiky a fungování fronty zakázek:** Jakmile přijde zakázka do laboratoře, zaznamenává si aktuální čas simulace. Zabírá si zdroj ve formě zaměstnance, který zakázku začne obstarávat. V opačném případě se zařadí na příslušné místo ve frontě zakázek a pasivuje se (volá funkci `Passivate()`). Zakázky, jež byly kompletně zpracovány, pak zaznamenávají statistiky o časovém intervalu od příchodu až po jejich vyřízení. Pokud je fronta zakázek neprázdná, aktivují další v pořadí a to s ohledem na volné zdroje příslušného referenčního zařízení.

## 4.2 Spuštění simulačních experimentů

Pro modelování vývoje systému za různých okolností předchází spuštění simulačního experimentu upravení konstant ovlivňujících chování simulačního modelu. Pro překlad a spuštění programu lze použít příkaz

```
make run
```

## 5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem této sekce je ukázat vývoj systému za různých okolností pomocí simulačních experimentů a demonstrovat jejich přínos při analýze následujících scénářů. Experimenty jsou navrženy tak, aby zodpověděly klíčové otázky týkající se výkonnosti laboratoře v různých provozních podmínkách, identifikace úzkých míst (*bottlenecking*) a vlivu zavedení automatizace či změny podílu prioritních zakázek. Výsledky experimentů umožňují odhadnout, jaké dopady mohou mít změny parametrů systému na jeho výkon, a identifikovat optimální přístup ke zpracování zakázek.

Byly provedeny 2 sady (bez automatizace a se zavedením externisty pro vývoj automatizačních programů) po 3 experimentech:

- Ověření typického chodu laboratoře.
- Analýza vlivu zvýšení podílu prioritních zakázek.
- Analýza vlivu zvýšeného přísunu zakázek.

Pro každý scénář jsou uvedeny naměřené hodnoty, které umožňují porovnat simulované výsledky mezi různými provozními podmínkami. Sekce zároveň obsahují komentáře k naměřeným datům a jejich interpretaci, která poskytuje přehled o výkonnosti systému a vlivu jednotlivých faktorů. Celkové shrnutí simulačních experimentů lze najít v sekci 6.

## 5.1 Běžný chod laboratoře bez automatizace

Tento scénář by měl sledovat *bottlenecking* chodu laboratoře bez vlivu externisty a měl by korelovat s chodem laboratoře za typického odhadovaného vytížení, kde zakázky ohlašují příchod do systému v průměru 2x za pracovní den, podíl prioritních zakázek je 20% a v průměru u každé druhé zakázky je nutná justace, ta trvá v průměru 1 hodinu.

### 5.1.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	612.2	3107.2	6201.0
Průměrný počet odmítnutých objednávek	105.2	472.6	1219.2
Průměrný počet chyb	31.6	159.0	318.0
Průměrný počet rekalibrací	7.6	27.0	64.2
Průměrný počet katastrofických selhání	2.8	15.2	30.8
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.0	1.4	2.8

Tabulka 1: Průměrné výsledky simulace pro typický scénář

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	22.3	26.4	27.7
Maximální čas	261.08	362.37	389.34
Průměrný čas	49.42	45.11	47.01
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	22.3	26.9	33.1
Průměrná délka	3.12	2.91	3.01
Maximální čas	172.13	243.33	312.21
Průměrný čas	23.68	21.82	20.15
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	535.38	781.83	812.31
Průměrná hodnota	71.62	62.71	66.77

Tabulka 2: Statistiky front a času zpracování zakázky pro typický scénář

### 5.1.2 Komentář k naměřeným datům

Za běžného provozu kalibrační laboratoře bez vývoje automatizačních procesů lze pozorovat validní data, přibližně odpovídající typickému chodu menší laboratoře. V rámci simulace jsme vyzorovali úzké hrdlo finalizace zakázek vedoucím na tvorbě kalibračních listin. Pro laboratoř je tedy výhodné pro jeho eliminaci rozšířit úroveň elektrotechnické kvalifikace pro další zaměstnance.

## 5.2 Vyšší podíl prioritních zakázek bez automatizace

Účel tohoto scénáře je navýšení podílu prioritních zakázek do systému. Tento scénář by měl modelovat např. přechod dodavatelské společnosti na novou infrastrukturu při zavedení nových přístrojů, jež vyžadují kalibraci. Laboratoř by pak měla mít snížený příchod zakázek od soukromníků, případně zakázek nižší priority. Podíl prioritních zakázek byl zvýšen na 50%.

### 5.2.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	654.8	3195.8	6444.2
Průměrný počet odmítnutých objednávek	50.2	400.6	813.2
Průměrný počet chyb	33.0	165.4	324.4
Průměrný počet rekalibrací	7.2	30.6	68.6
Průměrný počet katastrofických selhání	3.6	14.4	35.0
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.6	1.8	4.0

Tabulka 3: Průměrné výsledky simulace pro scénář vyššího podílu prioritních zakázek

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	22.7	30.5	35.3
Maximální čas	310.34	612.33	772.12
Průměrný čas	39.33	53.33	53.72
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	33.6	28.5	52.2
Průměrná délka	3.71	2.87	3.52
Maximální čas	189.12	167.25	392.12
Průměrný čas	23.87	23.09	22.25
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	527.67	1310.23	1101.21
Průměrná hodnota	61.65	73.26	76.52

Tabulka 4: Statistiky front a času zpracování zakázky pro scénář vyššího podílu prioritních zakázek

### 5.2.2 Komentář k naměřeným datům

V rámci experimentu jsme zjistili, že maximální hodnoty zpracování zakázky a přijetí ke kalibraci se při tomto scénáři navyšují. Jedná se o důsledek toho, že prioritní zakázky nemohou být odmítnuty, tudíž tvoří fronty delší, než je očekáváno a v krajních scénářích mohou přehltnout chod laboratoře.

### 5.3 Zvýšený přísun zakázek bez automatizace

Za předpokladu, že by se vrátila norma k typické kalibraci co 1 rok, případně by se na základě interních změn dodavatele vyžadovaly častější kalibrace, očekává se jejich častější přísun, ale zároveň nižší potřeba justace a její zkrácení (zařízení častěji kalibrovaná by měla pravděpodobněji odpovídat specifikaci). Tento scénář také může modelovat například zrušení konkurenční laboratoře v okolí a přísun zakázek od soukromníků. Ohlášení zakázek bylo zvýšeno na průměrně 3,2 zakázky denně a podíl zakázek vyžadujících kalibraci následovanou justací je 20%, justace pak trvá v průměru 15 min.

#### 5.3.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	666.8	3453.2	6885.0
Průměrný počet odmítnutých objednávek	463.8	2382.8	4791.6
Průměrný počet chyb	35.2	181.6	332.4
Průměrný počet rekalibrací	8.0	28.8	59.8
Průměrný počet katastrofických selhání	2.8	18.2	35.6
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.0	2.8	5.2

Tabulka 5: Průměrné výsledky simulace po zvýšení přísunu zakázek

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	28.2	32.4	33.1
Maximální čas	291.91	462.17	426.37
Průměrný čas	67.52	73.18	75.28
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	24.8	35.4	33.2
Průměrná délka	3.56	3.23	3.42
Maximální čas	156.85	284.75	287.09
Průměrný čas	18.87	19.23	19.52
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	712.22	1101.22	1232.32
Průměrná hodnota	91.40	103.52	103.25

Tabulka 6: Statistiky front a času zpracování zakázky po zvýšení přísunu zakázek

#### 5.3.2 Komentář k naměřeným datům

Experiment při stálém zvýšení přísunu objednávek, ačkoliv za snížení času justace a procentuálního výskytu nutnosti justace zařízení, ukázal, že laboratoř na takový zdvih přísunu zakázek není dostatečně připravena. Odmítnuté zakázky totiž tvoří přes 2/3 zakázek vzhledem k stále obsazenosti fronty zakázek.

## 5.4 Běžný chod laboratoře s automatizací

Do systému je nyní zaveden externista, který provádí automatizaci. Očekává se postupné zrychlení práce kalibrace. Avšak vzhledem k zabránění daného přístroje externistou, jež software vyvíjí déle, než probíhá manuální kalibrace, očekáváme variabilní výsledky.

### 5.4.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	623.2	3310.4	6681.0
Průměrný počet odmítnutých objednávek	82.6	324.0	663.8
Průměrný počet chyb	33	156.2	335.8
Průměrný počet rekalibrací	6.8	34.4	60.4
Průměrný počet katastrofických selhání	2.6	16.6	29.0
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.2	1.8	2.4
Průměrná pravděpodobnost automatické kalibrace	0.351	0.75	0.75

Tabulka 7: Průměrné výsledky simulace po přijetí externisty

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	23.6	22.2	23.1
Maximální čas	230.4	243.2	261.5
Průměrný čas	46.50	26.91	25.34
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	19.2	30.2	34.2
Průměrná délka	2.30	2.34	2.19
Maximální čas	100.81	196.22	214.62
Průměrný čas	17.28	17.48	16.67
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	555.41	420.21	700.65
Průměrná hodnota	67.43	36.63	30.16

Tabulka 8: Statistiky front a času zpracování zakázky po přijetí externisty

### 5.4.2 Komentář k naměřeným datům

Zavedení práce externisty není příliš patrna, při jeho zaměstnání (způsobem popsaným v modelu), po kratší dobu (po dobu jednoho roku), kdy zlepšení efektivity systému dosahuje kolem 20%. V rámci vyšších časových období však model potvrzuje vliv automatizace na kalibraci, v časovém okně deseti let dochází k přibližně 50% poklesu odmítnutých objednávek a zvýšení rychlosti zpracování objednávek. Systém tak reaguje na zrychlení kalibrace pomocí automatizačního software. *Bottlenecking* však přetrvává v `ManagerQueue`, jež musí zvalidovat korektní výpis a při větším přísunu zakázek se jich v této frontě více hromadí.

## 5.5 Vyšší podíl prioritních zakázek s automatizací

Tento experiment sleduje vliv přítomnosti externisty na konkrétní případy zvýšeného podílu prioritních zakázek popsany v sekci 5.2.

### 5.5.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	639.8	3427.2	6911.2
Průměrný počet odmítnutých objednávek	50.6	226.6	444.6
Průměrný počet chyb	34.6	177.8	352.6
Průměrný počet rekalibrací	7.0	31.2	55.4
Průměrný počet katastrofických selhání	2.8	20.8	35.8
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.4	1.6	2.6
Průměrná pravděpodobnost automatické kalibrace	0.353	0.75	0.75

Tabulka 9: Průměrné výsledky po přijetí externisty pro scénář vyššího podílu prioritních zakázek

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	24.0	27.8	27.2
Maximální čas	347	330.2	455.6
Průměrný čas	39	29.46	28.82
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	21.0	30.4	42.8
Průměrná délka	2.12	2.17	2.27
Maximální čas	154.21	182.62	252.01
Průměrný čas	17.12	15.55	16.03
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	581.23	550.52	800.75
Průměrná hodnota	50.26	40.62	37.97

Tabulka 10: Statistiky po přijetí externisty pro scénář vyššího podílu prioritních zakázek

### 5.5.2 Komentář k naměřeným datům

Při zavedení vyššího podílu prioritních zakázek se ukázala práce externisty od časového okna pěti let jako výhodná. Scénář ukazuje snížení počtu odmítnutých objednávek v pětiletém časovém horizontu, kdy v časovém intervalu jednoho roku zůstává hodnota přibližně stejná. Tento fakt bychom mohli interpretovat tak, že za krátkou dobu simulace chodu laboratoře nedojde k jejímu vytížení na takové úrovni, že by měla v hojném počtu odmítat objednávky.



## 5.6 Zvýšený přísun zakázek s automatizací

Tento experiment sleduje vliv přítomnosti externisty na konkrétní případy zvýšeného přísunu zakázek do systému popsany v sekci 5.3.

### 5.6.1 Naměřená data

Metrika	1 rok	5 let	10 let
Průměrný počet zpracovaných objednávek	717.0	4167.8	8826.0
Průměrný počet odmítnutých objednávek	397.4	1585.8	2781.6
Průměrný počet chyb	40.8	207.6	435.0
Průměrný počet rekalibrací	5.6	29.8	61.0
Průměrný počet katastrofických selhání	4.6	19.2	44.4
Průměrný počet katastrofických selhání obou zařízení	0.4	2.4	3.0
Průměrná pravděpodobnost automatické kalibrace	0.348	0.75	0.75

Tabulka 11: Průměrné výsledky simulace po přijetí externisty a zvýšení přísunu zakázek

Statistika	1 rok	5 let	10 let
<b>OrderQueue</b>			
Maximální délka	28.6	30.6	30.0
Maximální čas	331.21	354.61	331.62
Průměrný čas	67.13	52.80	46.79
<b>ManagerQueue</b>			
Maximální délka	23.4	36.8	38.4
Průměrná délka	3.47	3.67	3.36
Maximální čas	152.02	199.61	200.21
Průměrný čas	18.72	16.84	14.88
<b>Processing Time</b>			
Maximální hodnota	780.52	900.72	819.23
Průměrná hodnota	89.02	75.90	65.52

Tabulka 12: Statistiky front a času zpracování zakázky po přijetí externisty a zvýšení přísunu zakázek

### 5.6.2 Komentář k naměřeným datům

Znovu se na tomto scénáři potvrzuje pomalý nástup zefektivnění systému pomocí zavedení automatizací. Potvrzuje se, že do doby, než je laboratoř vybavena větším podílem automatizačních skriptů, je nadměrně vytížena a musí odmítat téměř 2/3 příchozích zakázek. V rámci let je však fungování laboratoře více efektivní a poměr odmítnutých zakázek klesá. Snížení průměrných a maximálních časů (oproti předchozím dvěma scénářům uvažujícím automatizaci) je pak pouhý důsledek snížení přísunu zpracovávaných zakázek.

## 6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Napříč všemi simulačními experimenty jsme identifikovali tvorbu kalibračních listin jako hlavní úzké místo systému. Při vysoké zátěži se v této oblasti hromadí nedodělané zakázky, což negativně ovlivňuje výkon laboratoře. Řešením by mohlo být navýšení počtu zaměstnanců s kvalifikací pro zpracování a schvalování kalibračních listin rozšířením jejich elektrotechnického oprávnění.

Experimenty zároveň potvrdily hojnou propagaci pozitivních vlivů zavedení automatizace, která zlepšila provoz v mnoha aspektech. Vypozorované zlepšení se však potvrdilo až po delší době práce externisty.

Při simulacích vyššího přísunu zakázek byla laboratoř bez automatizace přetížena a nebyla schopna přijímat většinu příchozích zakázek. Naopak při zvýšení podílu prioritních zakázek došlo k odlišné distribuci doby strávené v jednotlivých částech systému, nicméně laboratoř si i za těchto podmínek zachovala funkčnost bez zásadního zneefektivnění. Tyto výsledky potvrzují výhody optimalizace kritických procesů a dlouhodobého zavádění automatizace.

## Reference

- [1] Boston University: How to use g++. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.cs.bu.edu/fac/gkollios/cs113/Usingg++.html>
- [2] cppreference.com contributors: C++ Reference Documentation. 2024, navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://en.cppreference.com/w/>
- [3] Czech Metrology Institute: Frequently Asked Questions (FAQ). Navštíveno: 2024-12-01.  
URL <https://www.cmi.gov.cz/faq>
- [4] Elektrotechnický svaz český, z.s.: Stupně odborné způsobilosti. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.elektrosvaz.cz/odborna-zpusobilost/stupne-odborne-zpusobilosti>
- [5] Energy Ombudsman: List of Complaints. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.energyombudsman.org/complaints-data>
- [6] Fakulta informačních technologií Vysokého učení technického v Brně: Modelování a simulace. 2024, navštíveno: 2024-11-25.  
URL <https://www.fit.vut.cz/study/course/IMS>
- [7] Fluke Corporation: How Often Should You Calibrate? Navštíveno: 2024-12-02.  
URL <https://www.fluke.com/en-au/learn/blog/calibration/how-often-should-you-calibrate>
- [8] Fluke Corporation: Double Your Productivity in the Calibration Lab. 2023, navštíveno: 2024-12-02.  
URL <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/electrical-calibration/double-productivity-calibration-lab>
- [9] GNU Operating System: GNU Make. 2023, navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.gnu.org/software/make/manual/make.html>
- [10] Peringer, P.; Hrubý, M.: Text k přednáškám kurzu IMS. 2024, navštíveno: 2024-11-25.  
URL <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/IMS/prednasky/IMS.pdf>

- [11] Petr Peringer and David Leška and David Martinek: SIMLIB. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/SIMLIB/>
- [12] Portella, W.; Frota, M. N.: Frequency of Calibration: A Critical Issue for Quality Control in the Pharmaceutical Industry. In *XVIII IMEKO World Congress: Metrology for a Sustainable Development*, IMEKO, 2006.
- [13] Wikipedia contributors: Standard Commands for Programmable Instruments. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Standard\\_Commands\\_for\\_Programmable\\_Instruments&oldid=1258872309](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Standard_Commands_for_Programmable_Instruments&oldid=1258872309)
- [14] Wikipedia contributors: Technique for human error-rate prediction. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Technique\\_for\\_human\\_error-rate\\_prediction](https://en.wikipedia.org/wiki/Technique_for_human_error-rate_prediction)
- [15] Český institut pro akreditaci, o.p.s.: Navštíveno: 2024-11-26.  
URL [https://www.cai.cz/?kategorie\\_subjektu=kalibracni-laboratore](https://www.cai.cz/?kategorie_subjektu=kalibracni-laboratore)
- [16] Český institut pro akreditaci, o.p.s.: Základní informace k revidované normě ČSN EN ISO/IEC 17025:2018. Navštíveno: 2024-11-26.  
URL <https://www.cai.cz/?p=2169>