



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Ondřej Vítovec

PREDIKCE POTŘEBNÉHO MATERIÁLU V TĚŽKÉ ÚDRŽBĚ
LETADEL

Diplomová práce

Praha 2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Ondřej Vítovec

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Predikce potřebného materiálu v těžké údržbě letadel**

Název tématu (anglicky): Prediction of required materials for aircraft heavy maintenance visits

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cíl práce: Návrh predikce potřebného materiálu pro plánované i neplánované práce v těžké údržbě letadel
- Analyzujte současný přístup k těžké údržbě letadel s ohledem na plánování potřebného materiálu
- Analyzujte relevantní data z provozu letecké údržbové organizace
- Analyzujte možná řešení predikce potřebného materiálu pro plánované i neplánované práce v průběhu údržby
- Navrhněte řešení predikce potřebného materiálu pro plánované i neplánované práce v průběhu údržby
- Vytvořené řešení ověřte a vyhodnoťte



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: R. Doc Palmer. Maintenance Planning and Scheduling Handbook, McGraw Hill Professional, 1999.
Kutner, M. H., Nachtsheim, Ch. J., Neter, J. and Wasserman, W. Applied Linear Statistical Models, McGraw-Hill Companies, 2005.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kála**

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2020**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Ondřej Vítovec
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....17. července 2020

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mě při mém studiu jakkoli podpořili. Zvláště děkuji zejména Ing. Martinu Kálovi za odborné vedení mé diplomové práce a také za poskytnuté rady a další informace k tématu, jež pro mne byly vždy velice přínosné. Dále děkuji organizaci CSAT, která poskytla data, tolik potřebná pro vytvoření této práce. V neposlední řadě bych rád vyslovil obrovský dík své rodině, zvláště pak rodičům, za veškerou důvěru a podporu, které se mi od všech během studia dostávalo.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne17. 5. 2021.....



.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

PREDIKCE POTŘEBNÉHO MATERIÁLU V TĚŽKÉ ÚDRŽBĚ LETADEL

Diplomová práce

květen 2021

Bc. Ondřej Vítovec

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší možnosti predikce potřebného materiálu těžké údržby letadel. Cílem je navrhnout řešení, které by při plánování tohoto materiálu zvýšilo efektivitu a tím snížilo náklady na údržbu. Základem je databáze z organizace oprávněné k údržbě CSAT a jako řešení byl vytvořen program, včetně uživatelského prostředí v softwaru MATLAB, využívající několik matematických predikčních modelů k vytvoření předpovědi poptávky na základě databáze, a to až na půl roku dopředu. Program je schopen předpovídat plně automaticky pro velká množství dílů v daném okamžiku nebo si uživatel může zvolit možnost předpovědi poptávky pro každý díl zvlášť. Tato druhá možnost je doplněna i o zobrazení detailních informací o daném dílu. Skrze uživatelské prostředí je možné modely upravovat a dosáhnout tak vyšší přesnosti předpovědi. Validace samotné přesnosti modelů je řešena na základě absolutních i relativních chyb, díky kterým je možné zjistit, zdali je použitý model vhodný pro predikci daného typu poptávky.

Klíčová slova

těžká údržba, plánování údržby letadel, predikce materiálu, předpověď materiálu, predikční modely

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

**PREDICTION OF REQUIRED MATERIALS FOR AIRCRAFT
HEAVY MAINTENANCE VISITS**

Master's Thesis

May 2021

Bc. Ondřej Vítovec

Abstract

This master thesis provides options for prediction of materials required for aircraft heavy maintenance visits. The main goal is to propose a solution, which would increase the effectiveness of a material supply process and thus to reduce maintenance costs. A database from an aircraft maintenance organisation was used and a computer software, including a graphic user interface, was developed using MATLAB. This program uses several mathematical forecasting models, which are able to make forecasts based on the database, up to six months in advance. The program can run automatic forecasts for both multiple and single parts or consumable material. Analysis using the latter option generates additional information from the database. Additionally, the user can manually adjust the setting of the forecasting models via the graphic user interface, helping to improve the accuracy of the forecast. The evaluation of the accuracy of provided forecasts is computed based on both absolute and relative errors, which can help determine whether the selected forecasting model is suitable for the given type of request.

Key Words

heavy maintenance, maintenance planning, material prediction, material forecast, forecasting models

Obsah

Seznam použitých zkratek.....	10
Úvod.....	13
1 Problematika údržby letadel	15
1.1 Dokumentace k údržbě letadel.....	15
1.1.1 Dokumenty a manuály vydávané výrobcem letadla	15
1.1.1.1 Airplane Maintenance Manual	16
1.1.1.2 Configuration Deviation List.....	16
1.1.1.3 Master Minimum Equipment List.....	16
1.1.1.4 Illustrated Part Catalogue.....	16
1.1.1.5 Task Cards	17
1.1.1.6 Service Bulletins, Service Letters.....	17
1.1.2 Dokumenty vydávané úřady.....	17
1.1.2.1 Airworthiness Directive	18
1.1.3 ATA 100	18
1.2 Organizace zajišťující údržbu	19
1.3 Traťová údržba	20
1.4 Těžká údržba.....	22
2 Plánování údržby	25
2.1 Work Order systém	29
2.2 Plánování materiálu a dílů.....	31
2.3 Spotřební materiál a rotující celky.....	33
3 Analýza relevantních dat z provozu MRO	39
3.1 Druhy poptávky.....	43
4 Návrh řešení predikce potřebného materiálu.....	48
4.1 Moving Average Forecasting Model (MA)	50
4.2 Exponential Smoothing Forecasting Model (ES).....	51

4.3 Brown's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (BDES).....	54
4.4 Holt's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (HDES)	55
4.5 Holt-Winters Exponential Smoothing Forecasting Model (HWES)	57
4.6 Croston's Forecasting Model (CROSTON).....	58
4.7 Syntetos-Boylan Approximation Forecasting Method (SBA)	60
4.8 Teunter-Syntetos-Babai Forecasting Method (TSB).....	61
4.9 Grey System Forecasting Model (GM)	63
5 Výpočet chyb a Tracking Signal	66
5.1 Relativní chyby	66
5.2 Absolutní chyby	66
5.3 Tracking Signal	68
6 Program a uživatelské prostředí v programu MATLAB	72
7 Validace přesnosti predikcí.....	81
8 Vyhodnocení výsledků.....	83
9 Závěr.....	85
Zdroje.....	87
Literatura.....	87
Internetové zdroje:	88
Seznam obrázků.....	89
Seznam tabulek.....	89
Příloha 1	91
Skript modelů pro predikci poptávky	91

Seznam použitých zkratk

AC	Advisory Circular	
AD	Airworthiness Directive	Příkaz k zachování letové způsobilosti
ADI	Average Demand Interval	
AMC	Airplane Maintenance Manual	Příručka pro údržbu letadla
AMO	Aircraft Maintenance Organisation	Organizace oprávněná k údržbě
ATA	Air Transport Association	Sdružení leteckých dopravců
ATM	Air Traffic Management	
BDES	Brown's Double Exponential Smoothing Forecasting Model	
CAMO	Continuing Airworthiness Management Organisation	Organizace k řízení zachování letové způsobilosti
CDL	Configuration Deviation List	Seznam povolených odchylek na draku letadla
CPCP	Corrosion Prevention and Control Program	
CPM	Critical Path Method	
CROSTON	Croston's Forecasting Model	
CRP	Capacity Requirements Planning	Plánování potřebných kapacit
CSAT	Czech Airlines Technics	
CSs	Certification Specifications	Certifikační specifikace
CV	Coefficient of Variation	Variační koeficient
CZIB	Conflict Zone Information Bulletin	
EASA	European Aviation Safety Agency	Evropská agentura pro bezpečnost letectví
ELA	European Light Aircraft	
EMDP	Electric Motor-Driven Pump	Elektrická motorová pumpa
ERP	Enterprise Resource Planning	Plánování podnikových zdrojů
ES	Exponential Smoothing Forecasting Model	

ESMA	Exponential Smoothing with use of Moving Average Forecasting Model	
EU	European Nation	Evropská unie
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecký úřad
FAR	Federal Aviation Regulations	Federální letecké předpisy
GM	Grey System Forecasting Model	
GUI	Graphical User Interface	Grafické uživatelské prostředí
HDES	Holt's Double Exponential Smoothing Forecasting Model	
HWES	Holt-Winters' Exponential Smoothing Forecasting Model	
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní asociace leteckých přepravců
IPC	Illustrated Part Catalogue	Ilustrovaný katalog dílů
LRU	Line Replaceable Unit	
MA	Moving Average Forecasting Model	
MAD	Mean Absolute Deviation	Průměrná absolutní odchylka
MAE	Mean Absolute Error	Průměrná absolutní chyba
MASE	Mean Absolute Scaled Error	
MCC	Maintenance Control Centre	
(M)MEL	(Master) Minimum Equipment List	Minimální seznam vybavení
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul	
MRP	Material Requirements Planning	
MTOM	Minimum Take Off Weight	Minimální vzletová hmotnost
NAS	National Airspace System	
PAC	Production Activity Control	Kontrola produkční aktivity
P/N	Part Number	
PP&C	Production Planning and Control	
RMSE	Root Mean Squared Error	Odmocnina ze střední kvadratické chyby
RSFE	Running Sum of Forecast Errors	
SB	Service Bulletin	Servisní bulletin

SBA	Syntetos-Boylan Approximation Forecasting Method	
SL	Service Letter	Servisní dopis
SMS	Safety Management System	
SRD	Storage and Recovery Document	Dokument o skladování a obnovení letadla
SRM	Structural Repair Manual	Příručka pro opravy konstrukce letadla
TC	Task Card	
TCCA	Transport Canada Civil Aviation	
TS	Tracking Signal	
TSB	Teunter-Syntetos-Babai Forecasting Method	
USA	United States of America	Spojené státy americké
WO	Work Order	

Úvod

V dnešní době se při údržbě letadel soustředí veškeré úsilí na maximalizování bezpečnosti letadel, dodržování bezpečnostních předpisů a předcházení jejich porušování a taktéž minimalizování nákladů na údržbu. Cesta k této trojici cílů však byla dlouhá a za její vznik vděčíme, bohužel, i smutným událostem z historie letectví. Byla to právě letecká neštěstí, která vedla k postupnému zavádění a zpřísnování pravidel, jak pro samotný let, tak i pro údržbu letadel, jež se stala neodmyslitelnou částí leteckého průmyslu dnešního světa. Zvyšování bezpečnosti a snižování nákladů si přirozeně odporuje, proto je nutné mezi těmito cíli nalézt rovnováhu, která bude vyhovovat veškerým zainteresovaným subjektům spojených s provozem a údržbou letadla. Stejně jako pro provozovatele, tak i pro organizace provádějící údržbu letadel, je rozhodující čas, který letadlo stráví na zemi a je na něm vykonávána údržba. V tento čas letadlo negeneruje žádné zisky. Pro údržbové organizace je ultimátním cílem provést předepsanou údržbu v co nejkratším čase a v požadované kvalitě. Některé kroky údržby jsou předem jasně definované a organizace se na ně může připravit, a to jak pracovní silou, tak i potřebným materiálem a vybavením. Nicméně existuje celá řada prací, které nemusí být provozovateli či organizací provádějící údržbu známy. Právě v případě této neplánované údržby vznikají největší zdržení a nárůst celkových nákladů na údržbu. Stejně jako celý letecký průmysl, tak se i údržba letadel neustále vyvíjí. Prostor pro další zlepšení kvality a zvýšení efektivity plánování údržby lze však stále nalézt, zejména v případě predikce potřebného materiálu pro tuto údržbu. Ten je i v současném světě z velké části zanedbáván, či dokonce úplně opomíjen. V takových případech jsou naskladňovány pouze vybrané díly v předem určených množstvích, které se v čase výrazně nemění.

Právě zefektivnění údržby letadel pomocí predikce potřebného materiálu pro danou údržbu se věnuje i tato diplomová práce. Hlavní motivací k jejímu vytvoření je fakt, že v dnešní době probíhá, v naprosté většině organizacích oprávněných k údržbě, plánování materiálů a dílů především na základě zkušenosti techniků, případně zaměstnanců plánování a v tomto procesu není ve velké míře užíváno sofistikovaných softwarů, či jiných predikčních metod.

Jako návrh řešení predikce materiálu v průběhu údržby bylo zvoleno vytvoření programu, který by tyto požadavky pro efektní predikce potřebných dílů splňoval, a to na základě historických záznamů o poptávce. Tyto záznamy byly poskytnuty organizací oprávněnou k údržbě Czech Airlines Technics (CSAT) ve formě databáze. K vytvoření tohoto programu bude využito softwaru MATLAB¹, kde bude zároveň vytvořeno i uživatelské prostředí, skrze které lze tento program ovládat a případně nastavovat. Program pracuje s matematickými predikčními modely, které jsou schopny předpovídat hodnotu poptávky po materiálu či dílů na tři nebo šest měsíců dopředu.

Hlavním cílem práce je navrhnout řešení pro zlepšení efektivity plánované i neplánované těžké údržby letadel, které by mohlo přinést úsporu především nákladů údržbových organizací. K tomu je samozřejmě nezbytné podrobněji analyzovat a zhodnotit současný přístup k těžké údržbě letadel s ohledem na plánování potřebného materiálu. Pro efektivní předpověď potřebných dílů je také potřeba analýza relevantních dat, poskytnutých společností CSAT. Navrhované řešení v podobě softwaru bude následně poskytnuto k využití v odborné praxi.

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

1 Problematika údržby letadel

V následující kapitole jsou popsány základy sloužící k pochopení celé problematiky spojené s údržbou letadel. Jsou zde představeny nejdůležitější manuály a dokumenty používané při údržbě letadel, bez kterých by bylo správné provedení údržby téměř nemožné. Tyto dokumenty taktéž často slouží i jako důkaz o provedení údržby letadla a je proto nutné je archivovat pro případné další přezkoumání. V neposlední řadě jsou v této kapitole popsány základní organizace přímo se podílející na provádění údržby letadel – tedy organizace oprávněné k údržbě (AMO) a organizace k řízení zachování letové způsobilosti (CAMO). Kapitola je uzavřena vysvětlením stěžejního rozdílu mezi takzvanou traťovou údržbou a těžkou údržbou letadla.

1.1 Dokumentace k údržbě letadel

Dokumentace je dnes již nezbytnou součástí údržby, a to nejen v leteckém průmyslu. Dokumentaci k údržbě letadel lze rozdělit do třech skupin. První skupinou je dokumentace vytvořená výrobcem letadla. U tohoto typu dokumentů jde převážně o manuály sloužící k popsání různých částí letadla a podle kterých se technici údržby letadel lépe orientují. Tato skupina dokumentace zahrnuje i certifikáty, které letadlo opravňují k letu. Druhou skupinou je dokumentace vytvořená úřady, a to jak na úrovni národní, tak i nadnárodní. Příkladem může být dokumentace popisující nutné změny na letadle, které se musí vykonat, aby letadlo mohlo být dále používáno v obchodní letecké dopravě. Poslední skupinou je pak dokumentace vytvořená přímo provozovatelem letadla. Dále do dokumentace můžeme zahrnout záznamy údržby, které se archivují v organizaci oprávněné k údržbě. Díky veškerým těmto záznamům můžeme spolehlivě kontrolovat, jaké práce se na letadle provedly a také to, kdo tyto práce vykonal. V této kapitole jsou představeny základní dokumenty, které se běžně používají v souvislosti s údržbou letadel.

1.1.1 Dokumenty a manuály vydávané výrobcem letadla

První skupinou dokumentů jsou takové dokumenty, které pro údržbové organizace vydává přímo výrobce letadla. To má samozřejmě za následek, že se tyto dokumenty mohou mírně lišit v závislosti na výrobcu. Za poskytnutí některých z nich si může výrobce žádat příplatek. Příkladem takového zpoplatněného dokumentu je Illustrated Part Catalogue (IPC). Některé dokumenty, mezi nimiž je i Airplane Maintenance Manual (AMM), si lze vyžádat, aby reflektovaly přímo jednu konfiguraci daného typu letadla. To

znamená, že provozovatel má k dispozici AMM, které je mírně upraveno tak, aby obsahovalo pouze informace o dané konfiguraci jeho letounu. V následujících odstavcích je uveden krátký popis několika dokumentů vydávaných výrobcem letadel.

1.1.1.1 Airplane Maintenance Manual

Příručka pro údržbu letadla (AMM) obsahuje veškeré základní informace o údržbě a samotném provozu letadla včetně jeho palubního vybavení. Pro každou část letadla AMM poskytuje nejprve popis systému nebo subsystému za účelem poskytnutí základní informace a způsobu, jak daný systém funguje. Následuje popis různých základních postupů vykonávaných při běžné údržbě, například jde o nahrazení LRU – Line Replaceable Unit – v daném systému. Dále AMM popisuje funkční a provozní zkoušky (*Anglicky: Functional and Operational Tests*) a také výměnu nebo kontrolu provozních kapalin.

1.1.1.2 Configuration Deviation List

Configuration Deviation List (CDL) je seznam povolených odchylek na draku letadla. Vydává ho výrobce letadla a tento seznam obsahuje veškeré části vně draku, které mohou při komerčním letu na letadle chybět a také udává jasné pokyny a pravidla pro let s letadlem, kterému nějaká taková část draku chybí.

1.1.1.3 Master Minimum Equipment List

Tento zvláštní seznam minimálního vybavení (MMEL) je dán výrobcem letadla, který v něm specifikuje pravidla a podmínky, s jakými posádka může s letadlem letět, pokud je v neprovozním stavu některý z jeho systémů nebo další vybavení. Tento dokument se může svým popisem zdát stejný jako CDL, to se ovšem soustředí pouze na odchylky vně draku. Provozovatelé si pak mohou tento dokument „zprísnit“ a to tím, že do něj přidají svá vlastní pravidla pro lety bez funkčního vybavení. Pak se z MMEL stává Seznam minimálního vybavení (*Anglicky: Minimum Equipment List – MEL*). V žádném případě však není možné jakákoli pravidla či podmínky z MMEL vymazat.

1.1.1.4 Illustrated Part Catalogue

Ilustrovaný katalog dílů (IPC) je specifický dokument vydávaný výrobcem draku letadla. Zahrnuje seznam a popis umístění veškerých jednotlivých částí letadla a jeho systémů neohledně na konfiguraci letadla provozovatele.

1.1.1.5 Task Cards

Takzvané „task karty“ (*Anglicky: Task Card – TC*) vznikly za účelem zjednodušení práce mechaniků údržby, a to hned z několika důvodů. TC představují jednotlivé úkoly, které uvádí AMM s tím, že každý úkol je vytištěný zvlášť a je mu přiřazeno specifické číslo úkonu a v dnešní době i čárový kód. Mechanik, který jde vykonat daný úkol, si k letadlu nese jen několik stran A4, kde má popsány daný systém a úkony, které má při údržbě provést, namísto celého AMM (ten dosahuje počtu v řádu desítek tisíc stran). Druhou výhodou je, že po vykonání práce načte čárový kód z TC, tím se do systému ihned zaneše splnění úkolu a také to, kdo daný úkol vykonal.

1.1.1.6 Service Bulletins, Service Letters

Pokud výrobce letadla nebo letadlového celku vymyslí vylepšení nějakého úkonu údržby, vydává dokument, kterým osloví provozovatele a upozorní je na případné změny. Takový dokument je vydáván ve třech formách. Prvním je servisní bulletin (SB), který je tzv. závazný servisní bulletin s vlivem na bezpečnost. Ten slouží spíše jako předloha pro úřady, protože jde o změny, které mají zvýšit bezpečnost. Úřad je pak vydává jako příkaz k zachování letové způsobilosti (AD). Druhým formátem SB je takový dokument, který provozovateli pouze navrhuje změny vedoucí například k efektivnější údržbě. Je pak zcela na provozovateli, kdy a jestli vůbec tato doporučení do své údržby zahrne. Jde tedy o informace pro zvýšení bezpečnosti nikoli s vlivem na bezpečnost. Třetí formou jsou pak servisní dopisy (*Anglicky: Service Letter – SL*), ty poskytují informace, jak zlepšit různé činnosti údržby bez úpravy nebo změny vybavení.

Mezi další dokumenty vydávané přímo výrobcem letadla je například Příručka vážení a vyvažování letadla (*Anglicky: Weight and Balance Manual*), dále Příručka prevence proti korozi (*Anglicky: Corrosion Prevention Manual*), nebo tzv. Wiring Manual, který obsahuje bloková schémata a logické diagramy všech elektrických a elektronických systémů letounu a elektrické kabeláže letounu. [2]

1.1.2 Dokumenty vydávané úřady

Mimo dokumenty vydávané výrobcem letadel existuje také řada dokumentů nebo nařízení, které jsou vydávány národními úřady nebo, jako je tomu v Evropě, nadnárodní organizací Evropská agentura pro bezpečnost letectví (*Anglicky: European Aviation Safety Agency – EASA*). Ta vydává různá Nařízení Komise (EU), kterými nastavuje pravidla pro letectví nad územím států EU. Dále k těmto nařízením existují i takzvané Certifikační Specifikace (*Anglicky: Certification Specifications – CSs*), které obsahují

mimo jiné i důležitou část „Přijatelné způsoby průkazu“, kde jsou definovány podmínky, za jakých musí daná část letadla správně a bezpečně pracovat. Ve Spojených státech to je Federální letecký úřad (*Anglicky: Federal Aviation Administration – FAA*) vydávající předpisy upravující provoz, návrh, výrobu i údržbu civilních letadel Federální letecké předpisy (*Anglicky: Federal Aviation Regulations – FAR*). Jde tedy o analogii k Evropskému pojetí bezpečnostních pravidel.

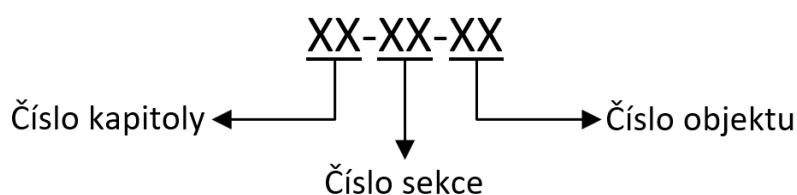
1.1.2.1 Airworthiness Directive

Navíc k výše uvedeným může jak FAA, tak i EASA, ale i jiné jim podobné organizace nebo úřady, vydávat takzvané Příkazy k zachování letové způsobilosti (*Anglicky: Airworthiness Directive – AD*). Tento příkaz slouží k tomu, aby úřad plošně nakázal všem provozovatelům daného typu nebo verze letadla je okamžitě opravit. Zpravidla je stanovena lhůta do kdy se musí daná oprava na letounu uskutečnit. AD dále popisuje komponentu, která je předmětem opravy, důvody, jež přiměly výrobce a potažmo úřad vydat toto AD a také způsob, jakým při výměně postupovat. [2]

1.1.3 ATA 100

Dokumenty, respektive manuály pro údržbu, označované dle formátu ATA 100 začaly vznikat od roku 1956, kdy sdružení leteckých dopravců (*Anglicky: Air Transport Association – ATA*) rozhodlo právě o tomto jednotném formátu číslování manuálů pro údržbu. Důvodem pro to byla různorodost, která v leteckém průmyslu do té doby panovala. Jak je tomu i v dnešní době, na výrobě jednoho letadla se podílí nespočet dodavatelů a externích společností. To mělo za následek, že manuály, které k jednotlivým typům letadel vznikaly, se od sebe výrazně lišily, a to i pokud šlo o dva typy stejného výrobce. Pro společnosti zajišťující údržbu letadel toto nesjednocené označování znamenalo zdržení a zmatky v provozu. ATA 100 je tedy standard pro výrobce, dodavatele a další zainteresované společnosti podílející se na výrobě či údržbě letadel navrhovaných dle CS-25, případně i CS-23, kde tento standard zavádí jednotné číslování (označení) systémů letadla jakožto kapitol, které nyní využívají všichni výrobci letadel na světě. Původně byla ATA 100 zamýšlena pro čistě papírovou dokumentaci k letadlům, nicméně s příchodem digitální éry, která výrazně zasáhla i do leteckého průmyslu, se na přelomu století rozhodlo o zpracování nové normy zahrnující i dokumentaci v elektronické podobě. Tato norma je označována jako ATA 2200.

Na Obrázku 1 vidíme schéma označování systémů dle ATA. Jde tedy z pravidla o šest číslic, kdy číslo systému nebo kapitoly striktně určuje ATA. Druhou dvojicí čísel tvoří číslo podsystému neboli číslo sekce. První číslici druhé dvojice také vždy určuje ATA, druhá se může lišit v závislosti na výrobci letadla. Posledním dvojčíslím je označován přímo objekt v daném systému. Tyto dvě číslice se taktéž mohou lišit v závislosti na výrobci letadla. Jako příklad pro číslování ATA uvedu označení 29-15-21 z AMM pro Boeing 737-300/400/500. Jedná se tedy o kapitolu 29 věnující se hydraulickému systému letadla. Sekce 15 se věnuje hydraulickému systému A, B i systému STANDBY. Číslo objektu 21 udává, že jde o pumpu EMDP (*Anglicky: Electric Motor-Driven Pump*) systému A i B. [2]



Obrázek 1 - Schéma číslování ATA [2]

1.2 Organizace zajišťující údržbu

Veškeré požadavky pro všechny organizace zajišťující údržbu jsou detailně popsány v Nařízení Komise (EU) č. 1321/2014. V současnosti existují tři druhy organizací, které mohou provádět údržbu letadel. První organizací je Organizace oprávněná k údržbě letadel (*Anglicky: Approved Maintenance Organisation – AMO*). Tato údržba je schválená podle části 145 (Part 145) a musí tak splňovat nejpřísnější pravidla pro údržbové organizace. Takovéto organizace působí především v obchodní letecké dopravě. Dále toto nařízení definuje organizace oprávněné dle Part M. Takové se oproti organizacím oprávněných dle Part 145 liší především v přísnosti všech pravidel a požadavků – jak pro samotnou organizaci, tak i pro její personál. Samozřejmě Nařízení Komise (EU) č. 1321/2014 je průběžně aktualizováno. Jedna z posledních změn z 24.3.2020, kdy je toto nařízení změněno Nařízeními Komise (EU) č. 2019/1383 a 2019/1384, je vytvoření nových příloh Nařízení č. 1321/2014.

Organizace k řízení zachování letové způsobilosti (*Anglicky: Continuing Airworthiness Management Organisation – CAMO*) slouží pro zajištění souvislé letové způsobilosti letadel. V Evropě, kdy na bezpečnost letectví dozírá především EASA, je povinností pro všechny majitele složitých letadel využít služeb organizace CAMO. Ze samotného

pojmenování této skupiny organizací – CAMO – je zcela zřejmá náplň její práce. Jednoduše řečeno jde o organizaci, která se stará místo majitele letadla, aby byla dodržena veškerá nutná údržba na letadle. Na tyto organizace se již vztahuje systém SMS a pro lepší srozumitelnost jim byla zřízena výše uvedená samostatná Part-CAMO v Nařízení Komise (EU) č. 1321/2014. [1]

1.3 Traťová údržba

Pro zachování letuschopného stavu letadla je nezbytné provádět pravidelnou údržbu. Tu lze primárně rozdělit na dva druhy údržby. Traťová (lehká) a těžká údržba. V této kapitole je popsána lehká údržba dopravních letadel. Tuto údržbu je nezbytné provádět takřka neustále, jelikož slouží jako základ pro zjištění a případnou opravu méně závažných problémů na letadle. K řízení a koordinování traťové údržby je využíváno specializované pracoviště známe jako Maintenance Control Centre (MCC). V závislosti na počtu letadel, o které se údržbová organizace stará, může jedno MCC koordinovat traťovou údržbu na více letištích zároveň. Traťová údržba se věnuje pracím na letadle, při kterých se nemusí letadlo dočasně vyřadit mimo službu. Probíhá tehdy, kdy je letadlo například zaparkované u nástupního mostu nebo případně na stojánkách v průběhu noci a není vytížené. Do traťové údržby tedy řadíme tzv. Daily Check, „A“ Check, případně „B“ Check, dále také veškerou údržbu, která je prováděna při pozemním odbavení letadla a také úkony pravidelné údržby, které jsou mezi Daily Check a „A“ Check. Pokud je letadlo vytížené, tudíž není čas na provedení dané údržby, nejméně nebezpečné závady se posouvají tak, aby letadlo dodrželo svůj letový plán. Pokud se objeví vážnější závada, letadlo je odstaveno, což způsobuje zpoždění nebo musí být nasazen záložní stroj. Veškerá práce na letadle je plánována oddělením Production Planning and Control (PP&C) a vykonávána MCC. PP&C jakožto centrum veškeré údržby na letadle plánuje údržbu na základě nutných modifikací, AD, SB, odložených závad apod. Jednotlivé úkony poté rozděluje na jednotlivá pracoviště těžké údržby, lehké údržby nebo do specializovaných dílen. MCC, které je odpovědné za traťovou údržbu, a to jak plánovanou, tak neplánovanou, tedy musí brát v potaz letový řád letadla a případné subdodavatele některých letadlových částí. MCC je také zodpovědné za nasmlouvání nových subdodavatelů v případě potřeby. Dále MCC zodpovídá za koordinování jednotlivých týmů údržby pro vykonání traťové údržby nebo případné přeplánování některých úkonů údržby na jiný čas, a to v případě, že daný úkon není možný na daném letišti v danou dobu vykonat a zároveň nejde o vážnou závadu, se kterou by nebylo možné provést přelet na jiné letiště. Jakmile MCC uzná, že se bude

daný úkon provádět až při těžké údržbě letadla, předává informace PP&C, které má tuto údržbu na starost. Je nutné podotknout, že veškerá odložená údržba na letadle musí být plně v souladu s předpisy a s dokumenty MEL a CDL.

MCC jakožto centrum pro řízení traťové údržby slouží například k:

- Zajištění vykonání Daily Check letadel ve stanovenou dobu,
- provádění traťové údržby, případně správné odložení závady – to vše v rámci pozemního odbavení letadla,
- koordinaci údržby s dalšími poskytovateli pozemního odbavení (tankování, catering, ...),
- spolupráci s dalšími odděleními údržby letadel pro správné plánování materiálu, prací a lidí, stejně jako ke spolupráci při řešení problémů,
- spolupráci a koordinaci činností traťové údržby se střediskem letového provozu, tak aby byl co nejméně narušen letový řád letadla,
- soustavnému monitorování statusů a požadavků na údržbu letadel, která jsou ve vzduchu,
- koordinaci údržby s dalšími stanicemi traťové údržby, pokud existují a taktéž ke koordinaci údržby se subdodavateli,
- shromažďování a další distribuci veškerých dokumentů spojených s traťovou údržbou letadla.

Pro správnou funkci traťové údržby je nezbytné zajistit MCC vybavení pro monitorování letadel a jednotlivých termínů potřebné údržby. Dále je samozřejmostí zajištění komunikace mezi MCC a dalšími subjekty zapojenými do traťové údržby. V neposlední řadě musí mít MCC přístup k celé škále technické dokumentace letadel. MCC je totiž zpravidla jako první informován o závadě, a tedy je zodpovědné za rychlé a efektivní řešení. V případě traťové údržby je právě MCC zodpovědné za vrácení letadla do provozu, nejlépe v rámci letového řádu. Zvláštní funkcí MCC je odpovědnost za vyšetření a vyřešení opakujících se poruch/problémů. Ty jsou běžně definovány jako problémy, které se vyskytnou třikrát v pěti dnech, případně čtyřikrát za sedm dní. Přesný časový interval se může lišit v závislosti na společnosti.

Při zjištění závady za letu existují dva možné postupy, jak situaci řešit. První možností je zápis problému do deníku letadla a po přistání předat veškeré informace pozemnímu personálu, který by měl začít situaci ihned řešit.

Druhou možností je konzultace problému s MCC ještě za letu. Některé problémy se podaří za letu vyřešit a na zbylé je pak pozemní personál připraven ještě před příletem letadla, tudíž je celá traťová údržba tímto procesem zefektivněna. Je tedy jasné, že z ekonomického hlediska budou letecké společnosti preferovat právě druhou možnost. [2]

1.4 Těžká údržba

Druhým typem pravidelné údržby je takzvaná těžká údržba. Organizace tento typ provádí z pravidla v hangáru. Nicméně provádět těžkou údržbu v hangáru není pravidlem, obecně však platí, že se bude provádět zcela mimo stojánky určené pro odbavení letadla na jeho let s pasažéry na palubě. Při těžké údržbě letadla se provádí časově náročné výměny a prohlídky letadla. K provedení tohoto typu údržby je nutné letadlo odstavit i na několik dní. Finální doba, kterou letadlo stráví na zemi, se odvíjí od počtu úkonů, které je nutné provést. V této práci je uveden alespoň základní výčet úkonů, které spadají do těžké údržby. Zejména se jedná o „C“ a „D“ Check nebo údržbu podobného charakteru. Tyto checky v sobě zahrnují celou řadu úkonů, které je nutno na letadle provést. Dále do těžké údržby řadíme významnější modifikace provedené dle nařízení AD, SB, zvláštní kontroly požadované úřadem nebo majitelem letadla, významné změny interiéru letadla nebo pokud má letadlo dostat nový nátěr. Jakmile je letadlo přistaveno pro provedení těžké údržby, která se skládá z různých kombinací výše uvedených činností, musí být jednotlivé úkony údržby správně naplánovány. Mluvíme zde o plánované údržbě, kterou má na starost PP&C a která významně zkracuje dobu letadla strávenou na zemi.

Organizace provádějící těžkou údržbu obvykle používá hangár jakožto zázemí pro práce na letadle. Velikosti hangárů se u jednotlivých společností liší v souvislosti s tím, na jakých letadlech daná organizace nejčastěji pracuje. Hangár by měl umožnit pojmout celé letadlo, nicméně některé hangáry nejsou dostatečně vysoké, tudíž musí zadní část letadla s vertikálním stabilizátorem zůstat mimo hangár. Hangár dále obsahuje kancelářské prostory a zázemí pro své pracovníky. Součástí takového hangáru často bývají specializované dílny, například lakovna nebo laboratoř nedestruktivního zkoušení. Jelikož je při těžké údržbě nutné provést velké množství jednotlivých úkonů, často bývají všechny vytištěné a připravené na jednom místě, odkud si je postupně technici odebírají a vykonávají.

V dnešní době se vše kontroluje i elektronicky skrze systém čárových kódů, které jsou unikátní pro každý úkon. Technici mají k dispozici čtečku čárových kódů, skrze kterou si daný úkol mohou zobrazit i v elektronické podobě nebo si vyhledat bližší informace atp. Samozřejmostí je, že každý díl, který se z letadla sejme, musí být řádně označen a uložen na dané místo.

Při těžké údržbě se vykonává také nespočet prohlídek mající za cíl nalézt případný problém již v zárodku, tedy v době, kdy letadlo, a vše v něm, pracuje přesně tak jak má. K tomuto se mimo vizuálních prohlídek využívají i takzvané Functional Checks a Operational Checks. Tyto testy jsou jasně naplánované a pracovníci ví, kolik s nimi stráví času. Jakmile takové testy objeví problém, je nutné ho řešit. Zde se jedná o neplánovanou údržbu, se kterou musí organizace vždy počítat, nicméně nikdy neví, kolik takových závad se na letadle při těžké údržbě objeví. Doba, za jakou je organizace schopna problém vyřešit, se odvíjí od daného problému, dostupného materiálu a také pracovní síly, která je aktuálně k dispozici. Opět zde platí, že čím letadlo zůstává na zemi déle, tím více finančních prostředků musí jeho majitel vynaložit. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že i neplánovanou údržbu je nutné určitým způsobem plánovat. Organizace většinou při plánování vychází ze svých zkušeností, avšak ne zřídka se stává, že se pobyt letadla na zemi vlivem neplánované údržby oproti původnímu plánu protáhne.

Velké problémy a zdržení úkonů těžké údržby způsobuje dostupnost, respektive nedostupnost náhradních dílů. Organizace obvykle nemají finance ani kapacitu skladu, aby byly schopny držet veškeré náhradní díly na daný typ letadla. V rámci plánované údržby organizace objedná dané díly tak, aby byly k dispozici, jakmile je letadlo na těžkou údržbu přistaveno. Pokud je objeven problém a musí být provedena údržba neplánovaná, dané díly se musí objednat a dovést. Existuje ještě jedna možnost, jak neplánovanou údržbu vyřešit. Pokud se při traťové údržbě přijde na problém žádající si výměnu některého dílu, který není na skladě, organizace se často uchylují k sejmutí daného dílu z letadla, které se právě nachází v těžké údržbě. Toto řešení sice umožní letadlu nenabrat velké zpoždění, ale může vnést poměrně značné problémy do právě probíhající těžké údržby. V krátkosti jsou popsány alespoň některé z nich. Pokud by se jednalo o díl, který již prošel nějakým druhem testování, dané testy budou muset proběhnout znovu, což prodlužuje dobu letadla na zemi, tedy snižuje efektivitu údržby. Dále je nutné daný díl objednat a pokud nedorazí včas, na letadle nebude možné

provést těžkou údržbu v termínu a problém se tedy jen přesune na jiné letadlo. V souvislosti s objednáním dílu je pak nutná dobrá komunikace mezi traťovou a těžkou údržbou, aby se daný díl kupříkladu neobjednal dvakrát nebo neobjednal vůbec. [2]

2 Plánování údržby

Těžká údržba letadel je v dnešní době součástí většího řetězce než jen dané organizace provádějící údržbu. Takový řetězec v sobě zahrnuje mimo údržbové organizace také vývojáře, výrobce nebo logistiku. V současnosti, kdy se obecně jednotlivé systémy, a ve velkém množství případů i samotné součástky, stávají stále složitějšími a na letadlech je takových systémů a součástí stále více, vzrůstá tlak na provedení těžké údržby letadla ve stanoveném čase a odpovídající kvalitě.

Obecně lze dostupnou odbornou literaturu, zabývající se problematikou těžké údržby, rozdělit do dvou směrů. První se zabývá tzv. „Service-scheduling“, což je obecné plánování údržby vícero letadel ve specifickém hangáru. Service-scheduling je v literatuře zaměřen, až na výjimky, pouze na oblast plánování prací na letadle. Druhý směr literatury se pak věnuje téměř výhradně rozvržení pracovní síly. K tomu jsou vytvářeny matematické modely, systémy pomáhající při rozhodovacím procesu (*Anglicky: Decision Support Systems*) nebo další online systémy. V literatuře se také často pracuje s faktem, že až polovina všech prací těžké údržby se nakonec ukáže být jako neplánovaná údržba. Tento fakt souvisí s tím, že počet neplánovaných prací roste s počtem vykonaných naplánovaných úkonů při těžké údržbě. [3]

Plánování potřebného materiálu pro těžkou údržbu letadel není v současné literatuře obsaženo v takové míře, jako například celý Service-scheduling. Proto je nutné zaměřit se v oblasti výzkumu i na tuto část údržby, která může v budoucnu přinést značné úspory v oblasti nákladů vynaložených na těžkou údržbu letadel. Tato diplomová práce je vytvořena právě za účelem navrhnutí způsobu, kterým by organizace byla schopna v co nejvyšší míře předpovídat budoucí poptávku po jednotlivých materiálech. Díky tomu by mohla včas materiál objednat a zkrátit tak celkovou dobu potřebnou pro údržbu.

V řízení těžké údržby letadel se tradičně využívají funkční aplikace. Příkladem takové funkční aplikace je metoda Critical Path Method (CPM) použitelná v projektovém managementu. Dále jde o plánování potřebného materiálu – MRP ve výrobě a při kontrole produkční aktivity (*Anglicky: Production Activity Control – PAC*). MRP se využívá především v prostředí samotné dílny nebo hangáru díky tomu, že právě zde probíhá plánování samotných operací na letadle – to vše samozřejmě v součinnosti

s dalšími druhy softwarových nástrojů, které jsou běžně při těžké údržbě využívány. V minulosti byla těžká údržba letadel neefektivní z důvodu absence integrity a spolupráce mezi jednotlivými systémy či dalšími softwarovými nástroji. Toto se zlepšilo až s příchodem nové generace funkčních aplikací označovaných jako MRPII. To vychází z předpokladu, že těžká údržba letadel zahrnující plánování jednotlivých prací na letadle a taktéž plánování potřebného materiálu, musí být vytvořena na základě standardních technik projektového managementu. Při tomto způsobu má, například plánování potřebného materiálu, probíhat vždy na začátku daného úkolu a používat se přitom má samostatný MRP systém. Jakmile je využito několika různých technik postrádajících vzájemnou integritu, budou výsledkem často nekoordinované úkoly a případný nedostatek nebo přebytek materiálu na skladě. [3]

Současné užívání vícero systémů má za následek nedostatečnou kapacitu pro plánování potřebného materiálu, včetně všech zdrojů, stejně tak postrádá kapacitu pro výhledové plánování, na již započatém projektu. To vede opět k manuálním zásahům po zbytek projektu. Dále je potřeba počítat s tím, že technika Plánování potřebných kapacit (*Anglicky: Capacity Requirement Planning – CRP*) není v takovýchto systémech využívána a tím není možné vložit do systému konečnou kapacitu zdrojů. Výsledkem pak je – i přes dostupnost potřebného materiálu – zpoždění celého projektu z důvodu nedostupnosti některých zdrojů pro určité práce. Organizace oprávněné k údržbě však již v dnešní době mají k dispozici celou řadu údržbových systémů napomáhajících při plánování údržby. Tyto systémy se stále zdokonalují a dnes jsou schopny kupříkladu načíst si data potřebná pro údržbu přímo z letadla, jakmile se letadlo připojí k internetu. Toto, ale i další aktualizace, pravidelně zvyšují efektivitu údržby, nicméně efektivní nástroj pro predikci potřebných dílů však v těchto systémech zpravidla chybí. [3]

Podle Doc. Palmera (2006, str. 342) by bez plánování údržby v leteckém průmyslu, průměrný technik strávil jen zhruba 25–35 % své pracovní doby skutečnou prací na letadle. Zbytek času by se musel věnovat objednávkou jednotlivých dílů a nářadí, administrativou atp. Plánování údržby je pak schopno zvýšit časový interval, který daný mechanik stráví prací na letadle o zhruba 55 %. Takové procento rozhodně není zanedbatelné, jelikož organizace s například 100 techniky bude po zavedení plánování údržby schopna provádět práce, na které by dříve potřebovala 155 zaměstnanců. Také další studie potvrdily, že zmíněných 35 % pracovní doby je úplné maximum, které je

technik schopný strávit pracemi na letadle bez využití plánování údržby. I přes tyto podklady organizace oprávněné k údržbě v minulosti nezavedly výrazné změny v plánování údržby. Důvodem byla nutnost velkých změn v organizacích a také přeškolení pracovníků na práci podle nových regulí, či práci s novými systémy. Je tedy patrné, že pokud chtěla organizace aplikovat smysluplně plánování údržby, musela projít poměrně zásadními změnami. [4]

V složitém procesu plánování údržby figuruje devět základních principů, které by měly zaručit základní úroveň efektivity plánování údržby. Prvních pět z nich se věnuje přímo plánování prací, zbylé principy se pak věnují plánování časových intervalů a harmonogramů. Jedná se o tyto principy:

- i) vytvoření prostor pro zaměstnance plánování údržby,
- ii) snaha o vyhnutí se dalším zpožděním,
- iii) oddělení plánování údržby potřebuje mít k dispozici informace o předchozích vykonaných pracích v organizaci (databáze WO, podpůrný software atd.),
- iv) nutnost zkušeností zaměstnanců plánování údržby,
- v) plánovat údržbu tak, aby se technici nemuseli zbytečně zdržovat a mohli svou práci vykonávat efektivně,
- vi) nutnost přiřadit každému úkonu předpokládanou dobu trvání, počet potřebných pracovníků a minimální požadavky na kvalifikaci technika,
- vii) redukuje zpoždění vzniknuvší přerušením daného úkolu,
- viii) vedoucí pracovník určí počet volných pracovních hodin techniků na následující týden a podle toho pak lze přidělit jednotlivé úkony tak, aby bylo zajištěno co nejvyšší využití techniků,
- ix) dodržování plánu prací v nejvyšší možné míře. [4]

Efektivita údržby se nejvíce projevuje na procentuálním podílu skutečně odvedené práce, kterou je technik schopen vykonat za pracovní dobu. Míra dodržení časového plánu poté ukazuje schopnost týmu pracovat podle týdenního časového rozvrhu prací, zároveň také do jisté míry kopíruje efektivitu práce. V procesu plánování údržby letadel hraje taktéž důležitou roli optimalizace, s níž je spojena i schopnost společnosti reagovat na problémy a jiné nenadálé události.

Je tedy patrné, že pole pro zvýšení efektivity těžké údržby je právě v jejím plánování, zvláště pak v predikci potřebného materiálu. Selhání jednotlivých komponent nebo i celých systémů plyne z jejich spolehlivosti. Tu lze obecně zvýšit dvěma způsoby. Prvním způsobem je takzvaná preventivní údržba (*Anglicky: Preventive Maintenance*). To je údržba, kdy se daná komponenta v systému mění za novou v závislosti na jejím odpracovaném čase, při čemž se nehledí na to, zdali je tato komponenta stále plně funkční nebo zdali vykazuje známky opotřebení a tak podobně. Druhým způsobem je pak tzv. prediktivní údržba (*Anglicky: Predictive Maintenance*), při které probíhá výměna nebo oprava komponenty vzhledem k jejímu reálnému opotřebení a celkovému stavu. Jde tedy o údržbu, která se často označuje jako „On condition“. Třetím způsobem je poté takzvaná údržba po poruše neboli „Condition monitoring“. U této údržby se části letadla provozují bez větších nároků na údržbu. Díly nebo části letadla se mění, až když dále nejsou schopny plnit svou funkci. Z toho vyplývá, že takto udržované díly nesmějí plnit funkci kritických dílů na letadle. Je tedy nutné jejich zálohování, případně jejich porucha nesmí mít dopad na bezpečnost letu.

Neplánovaná údržba je zpravidla nutná, pokud mechanik objeví závadu při běžné údržbě. Každá nová neplánovaná závada má nemalý vliv na plánování údržby jako takové, držení náhradních dílů na skladě nebo na přidělování lidské síly na jednotlivé úkoly. Neplánovaná údržba se negativně projeví nejčastěji na nákladech za údržbu nebo na porušení předem sjednaného termínu, kdy se má letadlo vrátit z těžké údržby zpět do provozu. Z předchozích vět tedy plyne, že pro základní fungování údržbové organizace je nezbytné, aby se s neplánovanými úkoly údržby počítalo dopředu při plánování materiálu a dalších nezbytných zdrojů k údržbě. Nicméně je zřejmé, že bez aplikace statistických a matematických modelů bude takto prováděná údržba daleko od efektivního stavu, kdy bude pro jedno letadlo daná rezerva příliš velká a pro jiné letadlo zase příliš malá.

Při plánování údržby se musí zohlednit a naplánovat široká škála úkonů. U těch, které nařizují výměnu dílu, není problém predikovat celkový počet takových dílů pro dané časové období. Při plánované údržbě se však pravidelně objevují závady, které je nutno odstranit a se kterými plán údržby nepočítal. I z těchto důvodů je v dnešní době stále obtížná predikce potřebného materiálu, kdy díly často nejsou v případě nutnosti na skladě.

Dle výše uvedeného je zřejmé, že snahou je zejména těžkou údržbu letadel co nejvíce zefektivnit, tedy co nejvíce zkrátit čas, které letadlo stráví na zemi a nepřináší tak majiteli zisk. Této redukce času lze dosáhnout hned několika způsoby, přičemž ty základní jsou v této práci popsány. [5]

Pro správné provedení údržby je také nutné vždy detailně popsat zjištěnou závadu. Tento zápis provádí technik údržby na základě úkonů plánované údržby, nebo na základě oznámení provozovatele, kdy provede fyzickou kontrolu míněné části letadla. Důkladný a úplný popis závady je nutný ke správnému plánování údržby včetně potřebného materiálu a náradí. V současné době v organizacích oprávněných k údržbě neexistuje systematický přístup k predikci potřebného materiálu. Základní materiál se na skladě drží v určitém množství a je naskladněn vždy, když toto množství klesne pod nastavenou úroveň. Některé materiály nebo díly jsou objednávány jen v případě, že je nutná jejich výměna na letadle. Pro organizace oprávněné k údržbě zpravidla platí, že nemohou mít na skladě 100 % potřebného materiálu v odpovídajícím množství ať již z kapacitních důvodů, nebo z důvodů uložení velkého kapitálu do tohoto zboží. Nutné je také zmínit, že některé materiály lze použít jen do jistého data, a tedy je jejich dlouhodobé skladování nemožné

Aby se implementace nového systému pro predikci potřebného materiálu organizaci vyplatila, je dobré uvést i konkrétní náklady na zaměstnance údržby. Dle Mezinárodní asociace leteckých dopravců (*Anglicky: International Air Transport Association – IATA*), je v průměru pro provedení těžké údržby letadel potřeba devět techniků a až dalších šest zaměstnanců organizace, kteří jsou na vyšších pozicích dané organizace. Tentýž zdroj také uvádí průměrné roční náklady na jednoho zaměstnance organizace oprávněné k údržbě, které v přepočtu činí 930 000 Kč. Pokud by tedy výše zmíněné predikce potřebného materiálu přinesly organizaci úsporu, byť jen jednoho pracovníka, pro organizaci by to znamenalo nemalé úspory celkových nákladů. [6]

2.1 Work Order systém

Celý systém work orderů (WO) je jedním ze základních a klíčových nástrojů, jak zajistit efektivní a produktivní údržbu. Tento systém zajišťuje distribuci informace o daném úkonu mezi jednotlivými pracovníky údržby letadel. Aby WO plnily svou funkci co nejlépe, je nutné, aby byla zachována jednotná forma a také, aby obsahovaly vždy rámcově stejné informace. WO tedy slouží k zápisu závady na letadle nebo také jako

příkaz práce. V druhém případě musí WO obsahovat popis poškození, detaily o letadle, oblast letadla, poškozené díly nebo komponenty, potřebné zdroje k vykonání práce a další detaily. WO také slouží k dokumentaci o akci, případně certifikaci. WO se i pro tyto účely v organizacích archivují.

WO v dnešní době existuje jednak v papírové formě nebo může být jeho část, případně celý WO, zpracováván ve formě elektronické. Nižší popsaný proces WO však dobře vystihuje jeho význam v plánování údržby. WO vzniká v rukou plánování údržby, technika údržby, anebo dalších osob, kteří k tomu mají v dané organizaci kompetence. Není však úplně důležité, kdo WO vytvořil, důležité je, aby do něj uvedl dostatek informací o daném problému a jeho umístění na letadle. Jedná se o systémy nebo přímo komponenty. Dále je potřeba určit prioritu popisovaného úkonu, tedy jestli je nutné ho řešit bezprostředně nebo ne. Je dobré, pokud se hned při vytvoření WO uvede zaměření technika, který by měl daný úkon řešit a případně uvést poznámku, že letadlo musí být pro vykonání tohoto WO připojeno k elektrické síti, či nikoliv.

Ve WO se často pro jistý druh informací, například pro náročnost údržby, určité kódy. Skupinou kódů může být klasifikace poškození, či časová náročnost. Technik z těchto kódů na první pohled vidí, o jaký typ údržby se jedná, jak složitá pro něj práce bude nebo zdali je nutné pro danou údržbu potřeba mít letadlo připojené k elektrické energii. Systém ATA zajišťuje patřičnou referenci a jedinečnost v odkazování, technik tak pro získání stěžejních informací nepotřebuje pročítat kompletně veškeré informace obsažené ve WO. Podle tohoto typu kódování lze také filtrovat v databázi WO, kdy je možné snadno najít veškeré WO, které se týkaly určitého systému. Pracovníci by měli přiřazovat kódy jednotně, aby nedocházelo k nesouladu v kódování. Plánování údržby také v této fázi přiřadí WO tým techniků, kteří ho budou mít na starosti. Zde je důležité správné vyhodnocení, jaká kvalifikace technika je na vykonání WO nutná. V případě traťové údržby je finální schválení takto vyplněného WO řešeno individuálně dle situace přímo na místě. V případě těžké údržby se WO vkládá do obálky revize údržby letadla a řešen je nejen na základě závažnosti závady. Prioritu určuje vedoucí týmu. V případě organizace CAMO, v rámci plánování údržby mohou být, takto vytvořené WO, dále konzultovány s vedoucími pracovníky plánování, kteří případně provedou potřebné úpravy. V tomto kroku lze stále měnit prioritu daného WO. K výše zmíněné konzultaci často slouží pravidelné schůzky, které mohou probíhat například každé ráno nebo při každém nástupu nové směny. Na těchto schůzkách není reálné probírat podrobně

veškeré WO, tudíž se projde jejich seznam, případně se proberou jen nejasné nebo urgentní WO nebo ty, kterých se týkají například nestandardní postupy údržby. Pokud je potřeba provést prioritní a urgentní údržbu letadla, WO se vystavuje ihned a nečeká se s ním do další schůzky.

Veškeré WO je možné v tomto kroku převést do papírové podoby a připravit je na dané místo, odkud si je vyzvedávají týmy techniků, které je následně provádějí. Pro zlepšení efektivity se ve velkých organizacích údržby používají i další podpůrné počítačové systémy. Základem je značení každého WO unikátním čárovým kódem. Zaměstnanci jsou poté vybaveni čtečkami čárových kódů, díky kterým si snadno daný WO dokážou vyhledat v počítači a případně si k němu vyhledat i části manuálů, které techniky vedou jednotlivými kroky k provedení údržby. Zároveň takový systém slouží k dohledu vedoucích pracovníků, jelikož mají přehled v reálném čase, na jakých WO se pracuje, které již byly provedeny a kolik úkonů údržby bude ještě na letadle nutné provést. Po dokončení práce je potřeba, aby se daný WO ukončil a tato informace se dostala i k ostatním týmům pracujícím na letadle. To je především z důvodu předcházení zpoždění, kdy některé práce na letadle lze provést až po vykonání prací jiných. Odpovědný pracovník tedy potvrdí vykonání daného úkonu ve WO. Taktéž by ti, kdo se podíleli na provedení úkonu, měli vyplnit informace sloužící jako zpětná vazba mimo jiné pro pracovníky plánování údržby.

Oddělení plánování údržby by mělo brát tuto zpětnou vazbu jako velmi nápomocnou, neboť přináší informace o daných úkonech z pohledu technika údržby vykonávající daný WO na letadle. Plánování údržby poté může bezprostředně poupravit například postup daného úkonu, aby byl pro příští použití připraven již s aplikovanou zpětnou vazbou. WO samotný je formulář, který se vždy vyplňuje velmi obdobným způsobem. Obecně je lepší, pokud je to možné, aby měl tento formulář jednu stranu, stejnou formu a také aby obsahoval veškeré potřebné informace. Jak již bylo naznačeno, každý takový formulář by měl být snadno identifikovatelný, tedy měl by mít své vlastní unikátní označení. V praxi je využíváno označení číslem spolu s čárovým kódem. [4]

2.2 Plánování materiálu a dílů

Velmi podstatnou součástí plánování údržby letadel je i správné a včasné objednání veškerých potřebných dílů a dalšího materiálu. To je samozřejmě možné pouze pro úkony plánované údržby. Včasné objednání potřebných dílů hraje významnou roli

v celkové efektivnosti údržby, jelikož se práce na letadle nemusejí pozastavovat z důvodu nedostatku materiálu nebo potřebných dílů. Pro oddělení plánování údržby jde tedy o zcela zásadní část jejich pracovní náplně. Historicky to byla právě nutnost plánovat potřebný materiál pro nadcházející údržbu, co přimělo organizace implementovat do své struktury první oddělení, které by tuto práci zajišťovalo. Je samozřejmé, že při plánování není možné počítat s veškerým materiálem, který bude k vykonání údržby potřeba, a to až do doby, kdy bude daná údržba skutečně provedena. To může při špatném pochopení vést ke snížení kvality vyplňování zpětné vazby směrem od samotných techniků údržby k zaměstnancům oddělení plánování.

Oddělení strategického zásobování starající se v údržbové organizaci o včasné zásobování potřebným materiálem, využívá ke své práci historická data o údržbě. Těmito daty jsou záznamy o vykonané údržbě, kde lze přesně vyčíst, kolik jakého materiálu bylo potřeba nebo minimálně odkaz na potřebný manuál nesoucí žádané informace. Oddělení strategického zásobování by pak mělo procházet podobné manuály, aby pro potřebné úkony údržby zajistili potřebný materiál. S rostoucím počtem vykonaných úkonů by se tedy měl tento proces v organizaci v průběhu let stále optimalizovat. Informace o potřebném materiálu pro plánovanou údržbu se uvádí jako součást WO, aby bylo zajištěno, že tuto informaci obdrží technici údržby letadel. Jako součást dalšího zefektivnění je možné uvést přílohu k WO obsahující i seznam materiálu, který bude při dané údržbě potřeba jen s určitou pravděpodobností – založeno na zkušenosti, že při údržbě daného typu se často objevuje daná porucha a k její opravě je nutné odpovídající materiál. K samotnému WO může v určitých případech existovat příloha. Ta poskytuje dodatečné informace o daném úkolu, které technikovi napomáhají k efektivnímu provedení práce. Pokud je příloha k WO k dispozici, mělo by to být zřejmé z hlavní strany WO. Pro jednoduché úkony údržby není doporučeno přikládat přílohy z důvodu snížení počtu papírů, se kterými musí technik údržby pracovat, což snižuje pravděpodobnost jeho pochybení. Jakmile si WO přebere technik a začne pracovat na úkonech v něm obsažených, musí si veškeré potřebné informace, které nejsou od plánování údržby připravené, vyhledat sám. Používá k tomu stejné podklady jako zaměstnanci plánování údržby. K plánování údržby se pak vrací jen hotový WO se zpětnou vazbou od techniků.

Oproti dobám dřívějším je dnes plánování údržby o poznání efektivnější zejména díky podpurným počítačovým programům, které může oddělení plánování údržby využít zejména k přesnému přehledu, kolik jakého materiálu je aktuálně k dispozici a také k rychlému zobrazení kolik materiálu je „zablokováno“ pro již naplánovanou údržbu. Pokročilý software by pak mohl být využit i k vyhledání veškerého potřebného materiálu k danému úkonu údržby, a to zcela automaticky. Nicméně takto pokročilé funkce nejsou k dispozici u všech dostupných softwarů a celková efektivita údržby je tedy závislá i na celkové úrovni podobného vybavení dané organizace údržby. Jakmile organizace oprávněná k údržbě začíná pracovat s novým zařízením, kupříkladu s letadlem, které je osazeno motory nového typu, obdrží zpravidla i sadu dokumentace týkající se daných motorů. Oddělení plánování údržby by mělo co nejrychleji připravit seznamy potřebného materiálu pro údržbu těchto nových motorů. To vše z důvodu, aby se včas naskladnil potřebný materiál a případně i díly a při následující pravidelné údržbě byl veškerý plánovaný materiál připraven k okamžitému použití.

V organizaci je potřebný materiál dělen z hlediska jeho potřeby udržovat ho na skladě. Pokud má být daný materiál naskladněn v určitém množství neustále, je definováno jeho množství a za naskladnění takového materiálu je zpravidla zodpovědné dedikované oddělení strategického nákupu, nebo také „Supply department“. Zvýšení počtu kusů daného materiálu na skladě se může odvíjet od počtu plánovaných prací, které jsou přímo úměrné počtu letadel přistavených k údržbě. O počtu letadel, které budou v následujícím časovém období k údržbě přistaveny, má informace oddělení plánování údržby, a proto je nutné, aby mezi tímto oddělením a oddělením strategického nákupu dobře fungovala komunikace ve formě včas předaných informací. Opět v dnešní době jde zpravidla o počítačový software, do kterého plánování údržby uvede potřebný materiál a jeho případný nedostatek by mělo oddělení zásobování včas identifikovat a materiál objednat.

2.3 Spotřební materiál a rotující celky

Jednotlivé díly potřebné k údržbě, můžeme dále dělit na takzvaně spotřební neboli *consumables* a rotující celky – *rotable parts*. Spotřební materiál se na letadle zpravidla mění, jakmile nastává porucha daného dílu, kdy není vyhověno testu nebo inspekci nebo jakmile uplyne předem definovaný časový interval, po který je bezpečné tento díl na letadle používat. Časový interval je nejčastěji definován letovými hodinami, či počtem vzletů a přistání, při kterých byl daný díl na letadle nainstalován. Takový díl se

na letadle mění za zcela nový, příkladem klasického spotřebního dílu mohou být těsnění, nýty, či filtry. U spotřebního materiálu dále platí, například pro 100 kusů totožného těsnění existuje jen jedno číslo dílu, tzv. Part Number (P/N). Pro běžné pracovní úkony údržby letadel je také důležité „Batch Number“, neboli číslo šarže. Oproti sériovému číslu, které je zpravidla unikátní pro každý jeden výrobek, je číslo šarže totožné pro veškeré kusy daného produktu. Zde je opět dobrým příkladem nýt. Jeden druh nýtu bude mít stejné Batch number, díky kterému lze jednotlivé druhy nýtů od sebe rozeznat a případně dohledat detailní informace o materiálu a dalších vlastnostech. Číslo šarže pak také slouží, pokud je třeba, například z důvodu poruchy při výrobě nýtů, tyto nýty stáhnout z oběhu.

Třetí typ materiálu je označován jako *Expendables*. Tento druh materiálu je specifickým tím, že neexistuje způsob, kterým by bylo možné tento díl opravit nebo se jeho opravení nevyplatí z ekonomického hlediska. Příkladem *Expendable* materiálu na letadle je olejový filtr. I z popisu vyplývá, že označení *Expendable* a *Consumable* jsou si velmi podobné. Pro tuto práci není důležité hledat detaily v lišících se popisech těchto materiálů. Některé společnosti by tak olejový filtr označily jako *Consumable*, jelikož tento díl není možné opravit a při údržbě se pravidelně vyměňuje za nový. Výjimkou může být materiál označovaný jako *consumable repairable*, který je v některých případech možné opravit a znovu instalovat na letadlo. Toto je omezené zejména jasně definovaným počtem možných oprav daného dílu. Jedním z mnoha faktorů určujících, zdali půjde o opravitelný spotřební materiál, je samozřejmě i ekonomičnost případné opravy. Takový materiál nalezneme na letadle například v podobě plastových krytů.

Pokud jde o rotující celek, každý jeden díl disponuje svým unikátním sériovým číslem, díky kterému můžeme tento jediný kus přesně dohledat. Dále se od spotřebních celků liší zejména možností čtených oprav. Tedy takový celek lze při běžném provozu několikrát z letadla při údržbě sejmout, opravit a opět na letadlo namontovat. Z pohledu efektivity údržby se na daném letadle takový díl zpravidla vymění za jiný a sejmутý díl se v příštích týdnech opraví a namontuje se zpět na letadlo až při další větší údržbě. Rotables lze také instalovat na jiné letadlo, než z jakého byly sejmuty. Rotující celky jsou zpravidla komplexnější než jakékoli spotřební díly, jejich cena je zpravidla řádově vyšší, a tedy se jejich oprava z ekonomického hlediska vyplácí. Rotující celky se v údržbových organizacích běžně neskladují ve velkých počtech. Důvodem malého, respektive žádného množství tohoto materiálu na skladě, může být jeho

vysoká cena, ale zejména se jedná o jeho nepříliš časté využití při pravidelné údržbě. Hranici, kdy už se organizaci vyplatí držet nějaký díl nebo materiál na skladě, určuje především frekvence jeho využívání, velikost skladu nebo dostupnost dílu na trhu. V neposlední řadě pak také časový interval, za jaký je schopna organizace mít potřebný materiál v hangáru. Jedná-li se o dodání materiálu v řádu hodin, je pro organizaci nepotřebné držet daný díl skladem. Jakmile by však dodání mělo trvat v řádu dní, je lepší, pokud má alespoň minimální množství organizace k dispozici okamžitě. Problém zde může nastat, pokud si organizace standardně drží jeden rotující celek na skladě a objeví se závada tohoto celku u dvou letadel současně.

Samotné objednávání těchto dílů, tedy dílu, které si organizace nedrží na skladě, je zpravidla v režii samotných techniků údržby, kteří objeví daný celek nefunkční nebo poškozený, případně vedoucí pracovník týmů techniků. V případě potřeby je samozřejmé i prodiskutování možností mezi oddělením plánování údržby a týmem techniků. Odpovědná osoba se tedy může lišit v závislosti na různých organizacích. Oddělení strategického nákupu by poté mělo být schopné v urgentních situacích nalézt co nejvýhodnější řešení v poměru cena a čas, za který bude dané zboží v hangáru. Ke správnému rozhodování tak musí disponovat zejména zkušenosti s nákupem zboží, ale také si musí udržovat přehled o možných dodavatelích nejrůznějších dílů. I v této činnosti dosti napomáhají technologie, skrze které je možné vyhledávat nejrůznější materiál nutný k údržbě a on-line porovnávat cenu u možných dodavatelů. Finální schválení objednávky nového dílu v případě těžké údržby letadel schvaluje zákazník, tedy zpravidla provozovatel letadla. Zde existuje i možnost, že potřebný díl dodá organizaci oprávněné k údržbě provozovatel letadla. Důležité pro udržení efektivity údržby je, aby bylo možné díly objednávat v jakýkoli den v týdnu.

To, zdali organizace přímo vyčlení určitého pracovníka, který bude mít na starosti jen a pouze objednávání dílů, které nejsou skladem, závisí hned na několika faktorech. Vyčlenění pracovníka by mělo nastat až v případě, že není možné žádným jiným způsobem změnit vnitřní funkci organizace za účelem zefektivnění celého procesu údržby letadel. Dalším důvodem pak může být složitost celého procesu objednání zboží, s čímž většinou daná organizace není schopna nic provést a musí ho akceptovat. Další podmínkou, která může v organizaci donutit vedení vyčlenit pracovníka pro nákup materiálu, který není skladem, je velikost dané organizace. Větší organizace mají zpravidla více zaměstnanců přítomných na pracovišti, kteří se starají o plánování

údržby, a tedy frekvence objednávek zboží je vyšší. S vyšším počtem zaměstnanců plánování údržby roste i pravděpodobnost, že se zvýší frekvence přejímky objednaného zboží. Tento proces opět zahrnuje nejen nutné vyplnění mnoha dokumentů, ale i fyzickou kontrolu zboží a jeho dopravení přímo k letadlu, což také zabírá drahocenný čas. V neposlední řadě je možné zavést tuto pozici v případě, že organizace nemá k dispozici dostatek, respektive přebytek pracovníků plánování, a tedy není pro organizaci výhodné, aby se věnovali i objednávání zboží.

V takovém případě je možné, aby tuto práci prováděl i člověk, který nemá s celým procesem údržby velké zkušenosti, nicméně lze pak očekávat, že zejména v počátcích bude jeho práce méně efektivní. Tento krok může organizaci přinést zvýšení efektivity údržby, ale v případě nevhodných vnitřních postupů to také může znamenat její snížení. V organizaci dále musí panovat řád v označování veškerých dílů, které nejsou nainstalovány na letadle. Jde tedy o díly nacházející se ve skladu, díly, které jsou připraveny na montáž v hangáru i díly, které byly z letadla jen dočasně sejmuty. Veškeré označení musí být čitelné, aby bylo na první pohled jasné, o jaký díl se jedná. Takovéto označení jednak urychluje práci technikům údržby, kteří neztrácejí čas s identifikací jednotlivých dílů, ale také předchází pochybením z hlediska bezpečnosti, kdy by mohlo dojít k chybné montáži některého z dílů na letadlo. Pokud bychom se zaměřili na díly, které se nacházejí ve skladu organizace, způsob jejich vydání se opět může lišit především v závislosti na velikosti daného skladu, respektive velikosti celé organizace.

V menších organizacích, kde technici musejí vyhledávat materiál a díly ve skladu, je vhodné zavést elektronický seznam veškerého dostupného materiálu a technici si tak mohou přesně najít místo ve skladu, kde se daný díl nachází, což značně urychluje celý proces. U větších organizací je pak téměř nutné, aby byl vyčleněn personál mající na starosti jen a pouze sklad, naskladnění materiálu a jeho následné vydávání. V takovém případě organizace musí zaměstnávat personál navíc, nicméně z ekonomického hlediska to v celkovém součtu vyjde organizaci mnohdy levněji. Důvody jsou zcela jasné, tedy technici údržby, případně zaměstnanci oddělení plánování údržby se mohou plně věnovat své práci a nemusejí se starat o naskladnění, třídění ani hledání materiálu ve skladu. Pro plánovanou údržbu a tedy materiál, který víme, že bude potřeba, je vhodné, aby oddělení plánování údržby po vytvoření WO odeslalo požadavky na materiál i do skladu. Respektive, aby takzvaně zarezervovalo daný

materiál, a tedy, aby vznikla jistota, že bude tento materiál dostupný i v den údržby. Takto zarezervované díly jsou většinou spjaty s číslem WO a personál ve skladu pak může nachystat daný materiál na přesný čas, například při střídání směn, a technici si ho pak jen vyzvednou. Dále se může aplikovat postup, kdy si technici na začátku směny vyzvednou materiál pro několik desítek WO a tento materiál si připraví přímo u letadla, aby nemuseli ztrácet další čas vyzvedáváním materiálu postupně. U tohoto postupu se však musí klást zvláštní důraz na označení veškerého materiálu, který se v hangáru nachází. Systém rezervace materiálu je prospěšný nejen pro techniky, ale i pro sklad samotný. Personál vidí v reálném čase druh a množství materiálu skladem a kolik ho v blízké budoucnosti bude potřeba. To zaručuje včasné objednání materiálu do skladu. V případě neplánovaného materiálu, který je skladem, si technik vyzvedne dané zboží ze skladu bez jakéhokoli předchozího oznámení.

Asi v každé organizaci se však někdy stane, že potřebný díl na skladě chybí. Existuje několik situací, jak k tomuto problému může dojít. První možností je, že vše v organizaci bylo správně naplánováno a zboží včas objednáno, ale chyba je na straně dodavatele, který nebyl schopen včas materiál organizaci dodat. Druhou možností je, že materiál se ve skladu nezarezervoval, a tedy v den, kdy ho tým techniků údržby potřebuje, nemusí být k dispozici. Pokud by byla řeč o neplánované údržbě, pak je pravděpodobnost nedostupnosti dílu na skladě o něco vyšší. V neposlední řadě může docházet k problémům, kdy je materiál zarezervovaný, ale technici si ho vyzvedli jiným způsobem, tedy práce je již hotová, avšak materiál zůstává ve skladu zarezervován. V tomto případě se nabízí jednoduché řešení, aby došlo ke zrušení rezervace, jakmile je v systému WO, spojený s tímto materiálem, označen jako vykonaný. V ostatních případech čeká plánování údržby nebo samotné techniky nelehký úkol. Rozhodnout se mezi dostupnými možnostmi, jak provést danou údržbu i bez potřebného materiálu. Například, pokud není zrovna k dispozici ventilátor pro kola hlavního podvozku, může se společnost rozhodnout vyměnit celé kolo za nové. Druhou možností je prodloužení celkové doby, kdy bude letadlo odstaveno a počkat, až se ventilátor narychlo do organizace doveze. V neposlední řadě je možné ventilátor nevyměnit a pokud to MEL umožňuje, uvolnit letadlo do provozu s neopraveným dílem.

V tuto chvíli se jedná o odloženou závadu. To, jaká možnost bude provedena, závisí především na tom, o kolik se jejím provedením zvednou náklady na údržbu. Je zde dobře patrné, že jakmile dojde k selhání dodávky některého dílu, tento problém markantně zvedá celkové náklady na údržbu. Je tedy vhodné, aby organizace procesu plánování a objednávání materiálu a dílů věnovala nemalou pozornost. [4]

Z výše popsaného tedy vyplývá, že pro organizaci oprávněnou k údržbě by bylo vhodné mít k dispozici řešení napomáhající k určení kolik jakého materiálu bude pro danou údržbu potřeba. Část této informace je obsažena v dokumentaci k letadlu, kde je jasně takový materiál popsán. Jak již víme, problém je v neplánované údržbě, o které neexistují téměř žádné informace až do okamžiku, kdy se daná část letadla skutečně prohlédne. Tato neurčitost v poptávce po daném materiálu způsobuje neurčitost v celém procesu plánování potřebného materiálu pro těžkou údržbu letadel. Údržbové organizace se tak musejí spoléhat na to, že budou mít případný materiál k dispozici nebo že budou schopny ho v přiměřeně krátkém čase obstarat. Toto ovšem není ideální řešení, a proto existují způsoby, jak, alespoň s určitou pravděpodobností, odhadnout potřebný materiál, respektive budoucí poptávku po daném zboží. Tyto metody ve směr využívají historická data, která dále používají pro odhad dat budoucích. Současné metody, které lze při předpovídání poptávky po daném materiálu použít, jsou například regresní analýza, predikce časových řad (*Anglicky: Time Series Prediction*), exponenciální vyhlazování (*Anglicky: Exponential Smoothing*), Bayesovská metoda, predikce s neuronovými sítěmi (*Anglicky: Neuron Network Prediction*) a také šedá předpověď (*Anglicky: Grey Prediction*). V této diplomové práci jsou použity metody zahrnující predikce časových řad, exponenciálního vyhlazování a také jeden model z části pracující s šedou předpovědí. [7]

3 Analýza relevantních dat z provozu MRO

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, data použitá při tvorbě této diplomové práce pocházejí z reálného provozu společnosti Czech Airlines Technics (CSAT), která působí na mezinárodním letišti Václava Havla v Praze, v Hangáru F. Soubor dat obsahuje detailní informace o daném dílu – tedy pro každé P/N. V Tabulce 1 je ukázka dat z poskytnuté databáze pro náhodně vybrané P/N 15444. Pokud v tabulce řádek není vyplněn, nebylo tomu tak ani v případě databáze poskytnuté CSAT. Číslo projektu bylo z tabulky odmazáno z důvodu zachování anonymity zákazníků CSAT. V tabulce jsou tedy v prvním a druhém sloupci uvedeny informace v podobě, v jaké s nimi pracuje personál v CSAT. Do tabulky je přidán třetí sloupec s doplňujícími informacemi pro čtenáře. Nejdůležitější informace jsou především ty, obsahující datum a počet instalovaných kusů daného dílu. Tyto dvě informace jsou zcela stěžejní pro vytvoření předpovědi poptávky.

Sloupec č. 1	Sloupec č. 2	Doplňující informace
<i>WP anonym</i>	Letadlo 4893	Letadlo, na které se materiál/díl instaloval
<i>pickslipno</i>	478811	Číslo, sloužící k vydání dílu ze skladu
<i>issue_date</i>	11.12.2016	Datum instalace
<i>issue_time</i>	14:49	Čas instalace
<i>type</i>	M	Informace, zdali byl materiál/díl měněn během plánované nebo neplánované údržby
<i>WO/TC</i>	4286778	Číslo WO nebo TC
<i>project</i>		Slouží jako reference pro účtování materiálu daného zákazníka
<i>TC reference</i>	53-050-00-01	Odkaz na práci, při které byla nalezena závada apod.
<i>partno anonym</i>	P/N 15444	Anonymizované P/N
<i>serailno</i>		Sériové číslo
<i>batchno</i>	377843	Číslo šarže
<i>owner</i>	CSA	Majitel materiálu/dílu
<i>qty</i>	21	Počet instalovaných kusů
<i>matclass</i>	C	Druh materiálu/dílu (Consumable, Expandable nebo Rotable part)
<i>description</i>	BOLT	Podrobnější popis dílu (např.: „rivet“, „o-ring“, „fuel pump“),
<i>remarks</i>	INTERIOR	Poznámky

Tabulka 1 - Ukázka dat poskytnutých z CSAT

Databáze obdržená z CSAT obsahovala údaje mezi lednem 2016 a lednem 2021 (včetně). Pro jakoukoliv práci s daty bylo nutné nejprve veškerá data anonymizovat, tedy byly odstraněny konkrétní registrace letadel a taktéž konkrétní P/N jednotlivých dílů. Registrační značky letadel nahradilo v označení „Letadlo 1“, „Letadlo 2“, až „Letadlo 5491“. P/N byly pak nahrazeny obdobným způsobem na „P/N 1“, „P/N 2“ až P/N 34 840.

Poskytnutá databáze obsahuje celkem 429 657 záznamů o údržbě, kdy každý z nich obsahuje informace, které jsou představeny v Tabulce 1. Již z předchozího odstavce vyplývá, že databáze obsahuje data pro celkem 34 840 různých materiálů nebo dílů, což

poskytuje poměrně obsáhlý vzorek relevantních dat. Celkový počet dílů také poukazuje na nutnost automatizace procesu predikce materiálu, aby bylo možné předpovídat díly hromadně, a to i v řádu desítek tisíc kusů. V databázi se nachází celkem 406 255 záznamů údržby, kde je materiál označen jako *Consumable* a pouze jeden záznam, kdy je materiál označen jako *Expendable*.

Z výše uvedeného lze tvrdit, že ve společnosti CSAT se zpravidla používá pouze označování *Consumables* nebo *Rotables*. Záznamů o *Rotable Parts* nalezneme v databázi celkem 23 399. Z tohoto poměru lze vyčíst, že téměř 95 % úkonů těžké údržby letadel pracuje se spotřebními díly. Je tedy možné vyvodit fakt, že organizace oprávněně k údržbě z velké části pracují s díly označenými jako *Consumables*, z čehož dále vyplývá nutnost predikce materiálu zvláště pro díly označené jako *Consumables*. Shrnutí poměrů jednotlivých typů materiálu vidíme v Tabulce 2.

Počet úkonů zahrnující materiál typu „ <i>Consumables</i> “	406 255
Počet úkonů zahrnující materiál typu „ <i>Expendables</i> “	1
Počet úkonů zahrnující materiál typu „ <i>Rotables</i> “	23 399
Celkový počet úkonů v databázi	429 657
Celkový počet dílů v databázi	34 840

Tabulka 2 - Souhrn počtu dílů a typů materiálů v databázi

Údržbové organizace nepotřebují předpovídat poptávku na každý den, na druhou stranu si taktéž nemohou dovolit předpovídat poptávku po dílech na celý rok dopředu. U velmi krátkodobých, například denních předpovědí, by hrál roli čas, který je nutný na přepravu dílu do údržbové organizace, a tedy by taková předpověď neměla smysl. U dlouhodobých předpovědí by to pak pro organizaci znamenalo nakoupit a uskladnit veškeré díly na rok dopředu, což je taktéž z finančního i logistického hlediska nereálné. Po konzultaci bylo rozhodnuto předpovídat poptávku čtvrtletně. Anonymizovaná, historická data o spotřebě neboli o poptávce, tedy bylo nutné uspořádat tak, aby byl získán součet pro každé P/N po jednotlivých čtvrtletích. Prvním čtvrtletím takto upravených dat bylo první čtvrtletí roku 2016 (Q1/2016) a posledním pak čtvrté čtvrtletí roku 2020 (Q4/2020). Měsíc leden roku 2021, který databáze ještě obsahovala, byl z dat odebrán, jelikož data pro první čtvrtletí roku 2021 by byla neúplná a tím značně zkreslená, což by se zcela jistě projevilo na přesnosti předpovědních modelů. Předpovědní modely tak pracují s uspořádanými daty v druhé tabulce.

Tato tabulka tak obsahuje pro všechna P/N pouze součty kusů za jednotlivá čtvrtletí. Výtažek z této tabulky, konkrétně pro náhodně vybrané P/N 612, je uveden v Tabulce 3. Pro samotné tvoření a práci jednotlivých předpovědních modelů jsou takto upravená data dostatečná. V programu, který je součástí této diplomové práce, a který je popsán v kapitole 6, modely postupně předpovídají hodnoty na další časová období, a to již zpravidla od prvního čtvrtletí roku 2017. Některé modely potřebují část dat k tomu, aby byly schopné vytvořit predikce. Pro každou další predikci však využívají veškerá reálně naměřená data, která mají k dispozici v okamžiku výpočtu. Tedy například pro určení předpovědí na Q4/2018, má model k dispozici veškerá reálně naměřená data mezi Q1/2016 a Q3/2018. Jedinou výjimkou je předpověď na druhé čtvrtletí roku 2021, kdy není k dispozici reálně naměřená hodnota poptávky z prvního čtvrtletí roku 2021 a tedy musí pro předpověď na Q2/2021 využít i předpověď z Q1/2021.

Čtvrtletí	Součet poptávky pro P/N 612
Q1/2016	5
Q2/2016	1
Q3/2016	0
Q4/2016	22
Q1/2017	23
Q2/2017	1
Q3/2017	4
Q4/2017	2
Q1/2018	11
Q2/2018	3
Q3/2018	11
Q4/2018	34
Q1/2019	5
Q2/2019	20
Q3/2019	0
Q4/2019	80
Q1/2020	8
Q2/2020	18
Q3/2020	0
Q4/2020	0

Tabulka 3 - Ukázka ze součtu dat poptávky pro jednotlivá čtvrtletí

Tento fakt se samozřejmě promítá do přesnosti předpovědi pro Q2/2021. Jelikož je poslední reálně naměřenou hodnotou v datech období čtvrtého čtvrtletí roku 2020, pro finální předpovědi prvního a druhého čtvrtletí roku 2021 je Q4/2020 označováno jako období v čase t , pro Q1/2021 a Q2/2021 pak platí označení $t+1$, respektive $t+2$, viz Tabulka 4.

Čtvrtletí	Q1/2016	Q2/2016	...	Q3/2020	Q4/2020	Q1/2021	Q2/2021
Označení času	$t-19$	$t-18$...	$t-1$	t	$t+1$	$t+2$

Tabulka 4 - Označení období v čase pro jednotlivá čtvrtletí

Je však nutné podotknout, že data obsahovala poměrně mnoho P/N, která měla celkovou poptávku za čtyři roky jen v řádech jednotek kusů. Jedná se například o „Raincoat“, který se mezi P/N objevil a za poslední čtyři roky byl využit jen jednou. Poptávku po těchto dílech tak údržbová organizace nepotřebuje předpovídat. Nicméně modely použité v této diplomové práci jsou schopné předpovědět poptávku i pro díly s nízkou historickou poptávkou a nebylo nutné tyto díly z databáze vyřazovat. Situace se mění při vyhodnocování přesnosti modelů, které se podrobněji věnuje kapitola 7.

Na poptávce po leteckých dílech se taktéž projevila pandemie koronaviru, která zasáhla všechna odvětví letectví, údržbu nevyjímaje. Poptávka především za poslední čtvrté čtvrtletí roku 2020 je u většiny dílů podprůměrná, což z části ovlivňuje předpovědi některých modelů na následující časová období, a je patrná v Tabulce 3, kdy se poptávka za poslední dvě sledovaná období rovná nule. Databáze bude samozřejmě aktualizována a spolu s případným postupným růstem poptávky, předpovědní modely tento růst zaznamenají a promítnou ho do svých předpovědí. Nebylo tedy nutné čtvrté čtvrtletí roku 2020 z databáze vyřazovat.

3.1 Druhy poptávky

Součástí analýzy databáze poskytnuté CSAT bylo i určit jednotlivé druhy poptávky pro díly v databázi. Na začátku je nutné zmínit, že poptávku po náhradních dílech potřebných k těžké údržbě letadel, je možné charakterizovat pomocí časových intervalů a také pomocí absolutních součtů kusů daných dílů, potřebných pro danou údržbu. Tedy, jak často a kolik daného materiálu je při dané údržbě potřeba. Pro určení druhu poptávky lze využít porovnání hodnot variačních koeficientů (*Anglicky: Coefficient of Variation – CV*) a také hodnoty Average Demand Interval (ADI). Pro

výpočet průměrné poptávky ADI použijeme vzorec (1.1). Pro výpočet variačního koeficientu CV pak použijeme rovnici (1.2), kde potřebujeme průměrnou poptávku ε_a získanou vztahem (1.3) a také aktuální poptávku ε_i v daném časovém intervalu. Ve vzorci pro výpočet CV je tedy v čitateli standardní odchylka hodnot, pro které CV počítáme a ve jmenovateli je jejich průměr. [8]

$$ADI = \frac{\text{Celkový počet časových intervalů}}{\text{Počet časových intervalů} \neq 0} \quad (1.1)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_a)^2}{n}}}{\varepsilon_a} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (1.3)$$

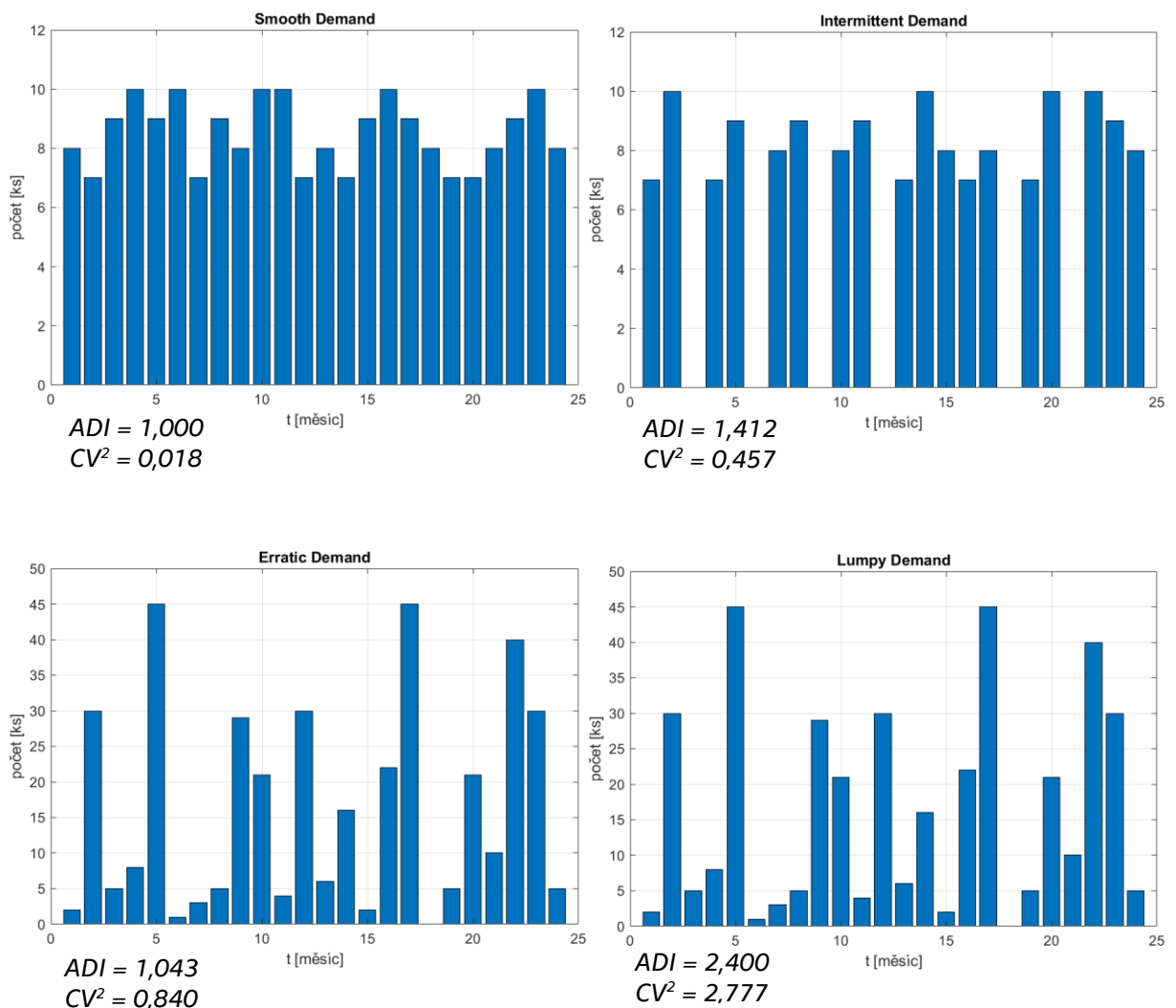
Pro jednoznačné určení daného typu poptávky použijeme přesnou hodnotu ADI , respektive CV umocněné na druhou. Tyto hodnoty byly stanoveny takto: máme-li $ADI < 1,32$, pak se jedná o konstantní rozdělení poptávky v čase, jestliže budou hodnoty rovné nebo větší než 1,32 bereme rozdělení poptávky v čase jako proměnné. Hodnoty $CV^2 < 0,49$ určují, že se jedná o poptávku, která svou velikost v čase mění málo a při hodnotách vyšších nebo rovných 0,49 poptávka mění svou velikost v čase s většími rozdíly. [8]

Druh poptávky	ADI	CV ²
Smooth Demand	<1,32	<0,49
Intermittent Demand	≥1,32	<0,49
Erratic Demand	<1,32	≥0,49
Lumpy Demand	≥1,32	≥0,49

Tabulka 5 - Druhy poptávky [8]

Na základě dvou výše zmíněných indikátorů, lze tedy přesně definovat, o jaký typ poptávky jde. Jejich přesné hodnoty pro jednotlivé typy poptávky vidíme v Tabulce 5. Prvním druhem je poptávka, která se příliš nemění, a to ani v čase ani ve své velikosti. V angličtině tento první typ označujeme jako „*Smooth Demand*“. Dále existuje nepravidelná poptávka – v angličtině „*Intermittent Demand*“. Tato poptávka má relativně malou variantnost ve velikosti poptávky. Naopak velká variantnost je u této

poptávky v časových intervalech, kdy je tato poptávka rozdílná nule. Třetím druhem je takzvaná nepředvídatelná poptávka, anglicky „*Erratic Demand*“, která je pravým opakem nepravidelné poptávky. Dochází k ní pravidelně, ale její velikost se případ od případu velmi liší. Posledním druhem je poptávka mající při své nenulové hodnotě velké rozdíly ve své velikosti, nicméně v časovém intervalu u ní dochází k relativně dlouhým časovým obdobím, kdy je tato poptávka nulová. V angličtině tuto poptávku nazýváme jako „*Lumpy Demand*“. Jednotlivé příklady těchto poptávek jsou uvedeny na Obrázku 2, kde jsou názorně zobrazeny výše popsané charakteristiky každého druhu poptávky. [8]



Obrázek 2 - Příklady druhů poptávek, vlastní tvorba

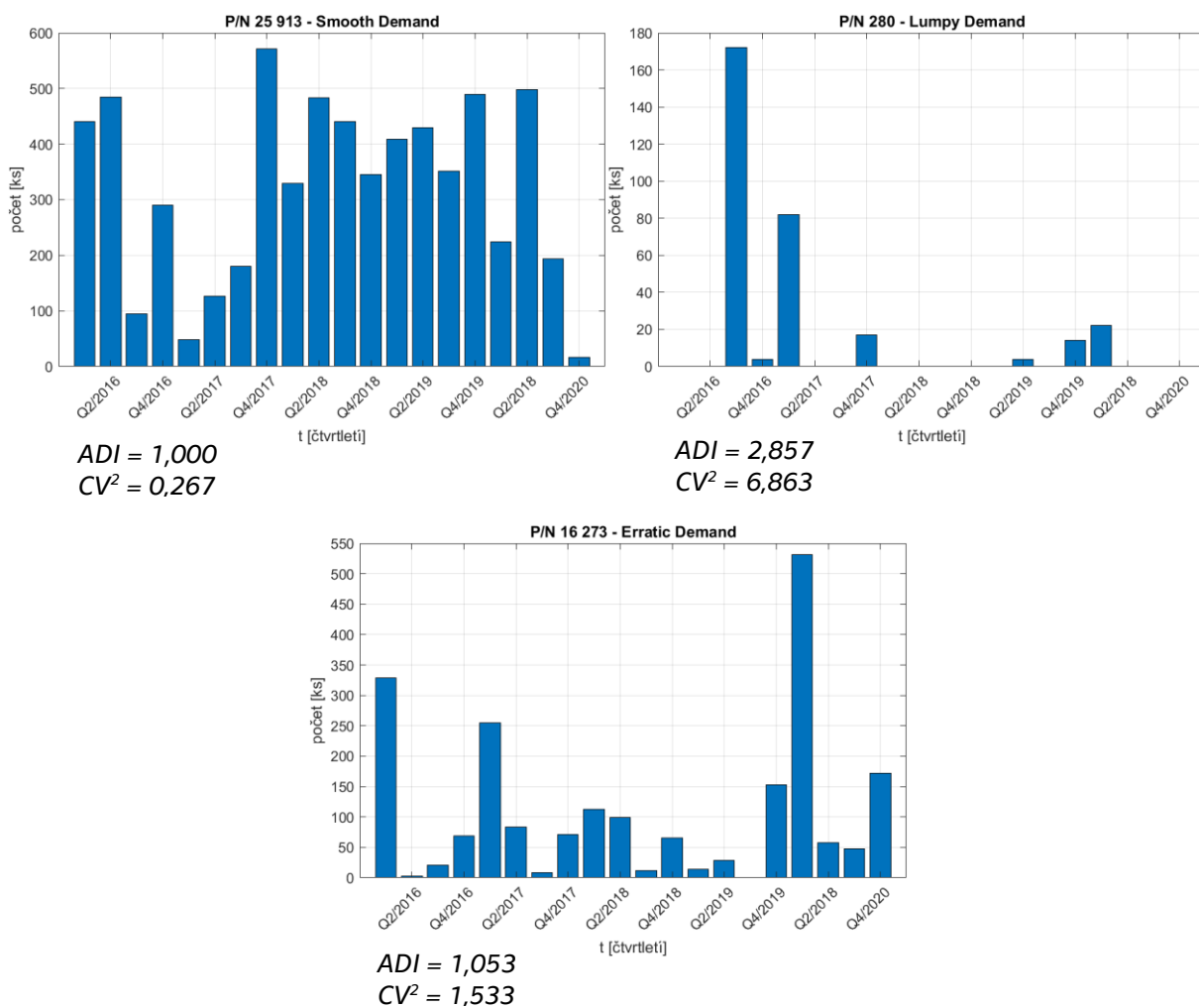
Zajímavé výsledky přinesla analýza databáze s ohledem právě na typ poptávky. Z celkových 34 840 typů dílů nebo materiálů bylo 33 399 určeno jako typ „Lumpy Demand“. Převaha tohoto typu poptávky v datech z organizace oprávněné k údržbě ukazuje, že poptávka po většině dílů je nepravidelná jak v časových intervalech, tak i v počtu kusů potřebných za tyto časové intervaly, a tedy její předpověď je problematická. Tento fakt dále poukazuje na potřebu zajistit způsoby, kterými by bylo možné předpovídat i velmi nepravidelnou poptávku. Drobným zkreslením těchto výsledků může být opět pandemie Coronaviru, jež způsobila pokles poptávky v posledních šesti měsících roku 2021, se kterými výpočty pro určení typu poptávky počítají. V Tabulce 6 jsou shrnuty součty ostatních druhů poptávek včetně procentuálního zastoupení.

Druh poptávky	Počet dílů [ks]	Procentuální podíl [%]
<i>Smooth Demand</i>	204	≈ 0,59
<i>Intermittent Demand</i>	0	= 0
<i>Erratic Demand</i>	947	≈ 2,72
<i>Lumpy Demand</i>	33 399	≈ 95,69
	Σ 34 840	Σ 100

Tabulka 6 - Rozdělení dílů z databáze dle druhů poptávek

Z Tabulky 6 je vidět, že poptávka typu „Intermittent Demand“ se v databázi neobjevuje ani jedenkrát a druhy *Smooth* a *Erratic Demand* dávají dohromady 3,31 % dílů, což jen potvrzuje tvrzení, že se v rámci těžké údržby letadel společnosti potýkají s nevyzpytatelným chováním poptávky po absolutní většině používaných materiálů. Pro lepší představu čtenáře jsou na Obrázku 3 uvedeny příklady všech tří typů poptávek, které jsou obsaženy v databázi poskytnuté organizací CSAT, a to včetně vypočtených hodnot *ADI* i *CV*².

Proces určení druhu poptávky může pomoci při výběru správného předpovědního modelu. Ne všechny předpovědní modely se hodí pro předpověď veškerých druhů poptávky. Indikátory *ADI* a *CV* nám tedy mohou pomoci zúžit výběr předpovědních modelů vhodných pro přesnou předpověď poptávky.



Obrázek 3 – Příklad druhů poptávek pro vybraná P/N z databáze

Pro úkony nepravidelné údržby spjaté s poptávkou po materiálu pro neplánovanou údržbu, jsou charakteristické časové intervaly, kdy je poptávka buď nulová, nebo jsou hodnoty v časových intervalech případ od případu velmi rozdílné. Z výše popsaného lze tedy předpokládat, že se bude nejčastěji jednat o nepravidelnou poptávku nebo o poslední druh poptávky, známý jako „Lumpy Demand“. Pro v čase neměnnou poptávku jsou vhodné klasické stochastické předpovědní modely, nicméně Rahman (2010, str. 472-477) tvrdí, že pro nepravidelnou poptávku a pro „Lumpy Demand“ vykazují tyto modely ve svých předpovědích jisté nepřesnosti. Pro tyto dva typy poptávek taktéž nejsou, dle jeho výsledků, vhodné ani klasické předpovědní metody, které fungují dobře pro systémy s normálním rozdělením.

4 Návrh řešení predikce potřebného materiálu

Pro správně fungující předpovědní model je nutné spojit plánované úkony údržby s těmi neplánovanými. Jedná se především o to, aby byl model schopný předpovídat úkony neplánované údržby, které vzniknou vlivem plánované údržby. Uvedu-li příklad z praxe, jakmile definujeme úkon pravidelné údržby, tedy plánovanou prohlídku podvozku, předpovědní model definuje určitou pravděpodobnost, že při této plánované údržbě bude potřeba vyměnit i pneumatiku, což je již úkon neplánované údržby. Analogicky mělo být možné vytvořit tuto pravděpodobnost potřeby náhradního dílu pro každý dílčí úkon plánované údržby. Celkový seznam potřebných dílů pro neplánovanou údržbu, který obsahuje dílčí pravděpodobnosti udávající potřebu tohoto dílu, bude k dispozici s dostatečnou časovou rezervou, než se letadlo přistaví k plánované údržbě. Organizace oprávněná k údržbě pak může dle udaných pravděpodobností včas objednat náhradní díly i pro neplánovanou údržbu. Problém může nastat, jakmile by předpovědní model neměl k dispozici dostatek dat, a tedy odhad pravděpodobnosti z takového modelu by nemusel být správný. Pro díly vykazující znaky „*Lumpy Demand*“ je vhodné začlenit takový díl do skupiny dílů, které na letadle plní stejnou nebo podobnou funkci a pravděpodobnost poté počítat pro celou tuto skupinu. Pokud by neexistoval podobný díl nebo pokud by skupina dílů stále neměla dostatek dat z minulosti pro správné odhadnutí pravděpodobnosti, existuje ještě jedna možnost. Zde je nutné vzít daný úkon plánované údržby a seskupit veškeré možné náhradní díly, které by mohly být potřeba pro odstranění neplánované údržby v návaznosti na prvotní úkon plánované údržby. Tímto způsobem je vytvořena skupina dílů, které jsou de-facto přiřazené jednomu WO. Model poté určuje pravděpodobnost pro celou tuto skupinu dílů. Je zřejmé, že použití poslední zvolené možnosti již nemůže zvýšit efektivitu údržby o tolik, jako možnosti předcházející, a to především z důvodu, že pokud model odhadne vysokou pravděpodobnost potřeby skupiny dílů, organizace by měla zajistit dostupnost veškerých dílů v této skupině, přičemž je však zřejmé, že při takto prováděné údržbě nebude využito všech objednaných dílů. [9]

V dnešní době existuje již celá řada predikčních nebo také předpovědních metod, s jejichž pomocí lze sledovat a předpovídat vývoj kupříkladu v poptávce po zboží. Do této diplomové práce je vybráno celkově deset variant předpovědních modelů:

- (1) Moving Average Forecasting Model (MA)
- (2) Exponential Smoothing with use of Moving Average Forecasting Model (ESMA)
- (3) Exponential Smoothing Forecasting Model (ES)
- (4) Brown's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (BDES)
- (5) Holt's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (HDES)
- (6) Holt-Winters Exponential Smoothing Forecasting Model (HWES)
- (7) Croston's Forecasting Model (CROSTON)
- (8) Syntetos-Boylan Approximation Forecasting Method (SBA)
- (9) Teunter-Syntetos-Babai Forecasting Method (TSB)
- (10) Grey System Forecasting Model (GM)

Toto relativně velké množství bylo zvoleno z důvodu různých typů poptávky, které se v databázi objevuje. Bylo tedy nezbytné pokrýt tento rozsah vícero modely, aby bylo dosaženo co největší přesnosti předpovědi pro každý typ poptávky. Celkový počet předpovědních modelů byl zvolen také za účelem porovnání přesností jednotlivých modelů při jejich aplikaci na data z reálného prostředí údržbové organizace. V následujících podkapitolách jsou modely jednotlivě představeny. Na konci každé podkapitoly je uveden graf s reprezentativním P/N číslo 5. Na těchto grafech je vykreslena jak reálná poptávka z databáze pro P/N 5 (zpravidla modře), tak vždy i predikce materiálu až po časový interval $t+1$, tedy po první čtvrtletí roku 2021 (zpravidla červeně). V této kapitole se také zpravidla užívá označení skutečné poptávky v daném intervalu X a hodnoty předpovídané poptávky X_f . Přesné hodnoty reálné poptávky P/N 5 mezi Q1/2016 a Q4/2020 jsou shrnuty v Tabulce 7. U většiny modelů se vyskytují takzvané Smoothing konstanty, česky označované jako vyhlazovací konstanty. Tyto konstanty jsou blíže popsány v následujících odstavcích. Smoothing konstanty jsou v těchto grafech nastaveny jednotně, protože cílem těchto grafů je

pouze přiblížit čtenáři to, jak předpovědní modely reagují na historická data. V této části nejde o maximální přesnost každého modelu. Vyhlazovací konstanty, které jsou popsány níže, byly pro grafy obsažené v kapitolách 4.1 až 4.9 nastavené na následující hodnoty: $\alpha = \beta = 0.4$; $\gamma = 0.05$. Z hlediska použitelnosti a také přesnosti předpovědi byly modely nastaveny tak, že jsou schopny předpovídat na jedno nebo na dvě čtvrtletí dopředu.

Čtvrtletí	Skutečná poptávka	Čtvrtletí	Skutečná poptávka
Q1/2016	17	Q3/2018	20
Q2/2016	22	Q4/2018	15
Q3/2016	12	Q1/2019	17
Q4/2016	11	Q2/2019	16
Q1/2017	18	Q3/2019	16
Q2/2017	48	Q4/2019	16
Q3/2017	28	Q1/2020	8
Q4/2017	35	Q2/2020	0
Q1/2018	15	Q3/2020	0
Q2/2018	25	Q4/2020	0

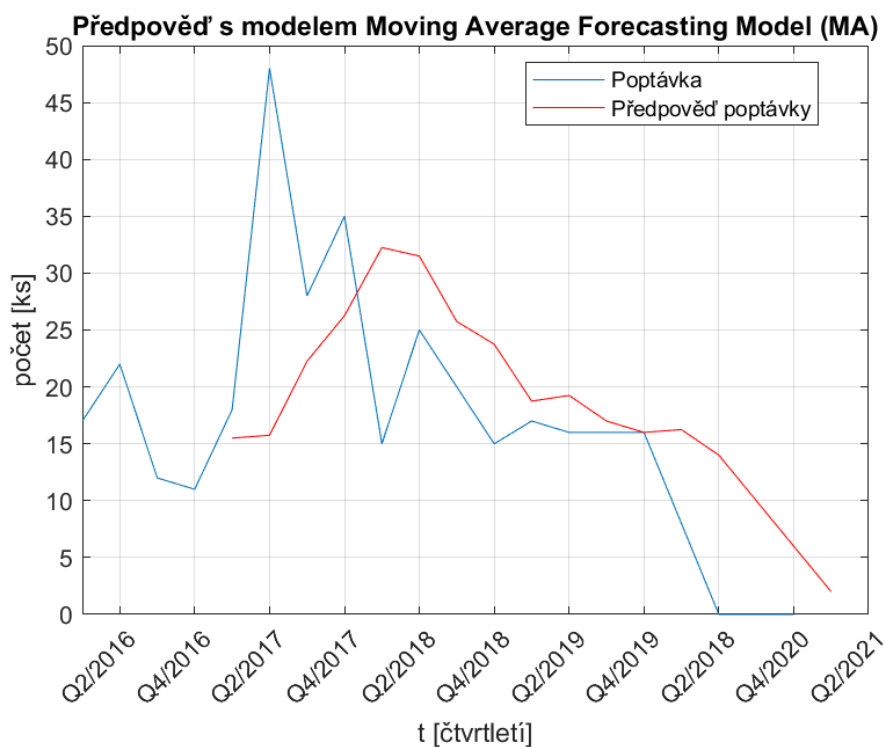
Tabulka 7 - Skutečná poptávka P/N 5

4.1 Moving Average Forecasting Model (MA)

Jedním z předpovědních modelů je Moving Average Forecasting Model (MA). Tato metoda předpovídá na základě průměru z několika posledních naměřených hodnot. Model MA je vhodný především pro poptávku typu *Smooth demand*, nicméně i pro ostatní typy poptávky tento model vykazuje uspokojivé výsledky přesnosti. Jako největší nevýhodu tohoto modelu je neschopnost jakkoli pracovat se sezónností poptávky. V této diplomové práci byl zvolen výpočet průměru na základě posledních čtyř naměřených hodnot poptávky.

$$Xf_{t+1} = \frac{X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + X_{t-3}}{4} \quad (2.1)$$

Jde tedy o období jednoho roku s tím, že tento model pracuje se stejnou váhou pro všechny hodnoty, z nichž počítá průměr. Model MA pracuje podle vzorce (2.1), kde Xf představuje předpověď poptávky pro čas $t+1$ a X reálně naměřená data. Příklad vykreslení předpovědi poptávky a skutečné poptávky pro model MA je na Obrázku 4. [9]



Obrázek 4 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu MA

4.2 Exponential Smoothing Forecasting Model (ES)

Druhým a třetím modelem použitým v této diplomové práci, jsou dvě varianty modelu Exponential Smoothing Forecast Model (ES). Obecně jde o model pro předpovídání na základě časových řad, který je opět spíše vhodný pro hodnoty poptávky, které se navzájem ve svých časových intervalech příliš nemění, tedy je nejvíce vhodný pro poptávku typu *Smooth demand*. Na rozdíl od modelu MA, využívá takzvaný „Smoothing“ parametr, kterým můžeme aktivně ovládat výstup z modelu. Jde o konstantu, v tomto modelu označenou jako α (α), díky které můžeme modelu nastavit určitou hladinu, blízko které se má při své předpovědi (pro čas $t+1$) pohybovat. Velikost smoothing konstanty α může nabývat hodnot v intervalu $(0,1)$. Pokud bude α blízká hodnotě jedna, předpověď pro čas $t+1$ se bude blížit reálně naměřené hodnotě v čase t . Jakmile bude hodnota α blízká nule, nebude mít předchozí hodnota v čase t na předpověď v čase $t+1$ takový vliv a výsledek předpovědi se bude pohybovat okolo průměru hodnot. Smoothing konstanta α se vyskytuje i v dalších modelech s totožným chováním. V dalších podkapitolách tedy již nebude smoothing konstanta α dále rozebírána.

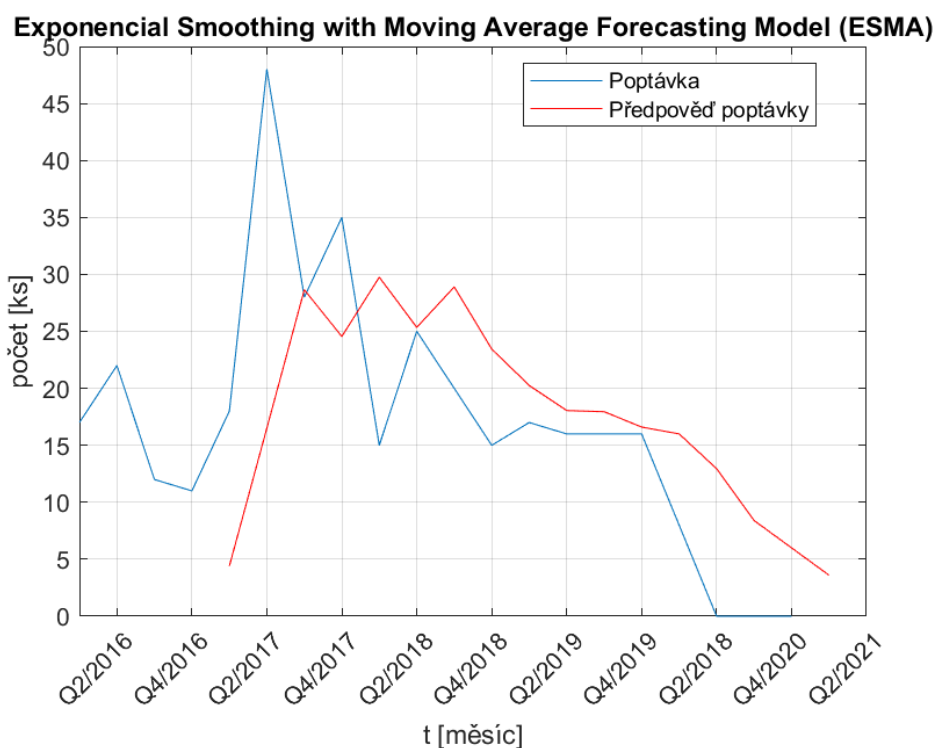
Obě varianty modelu pracují na obdobném principu, liší se jen v jedné hodnotě ve vzorci pro výpočet predikce. První způsob označme ESMA, čistě pro rozlišení od druhé varianty, která je již klasicky označena jako ES. Předpověď modelu ESMA je na Obrázku 5. Model ESMA vypočítává predikce X_f na základě vzorce (3.1):

$$X_{f_{t+1}} = \alpha X_t + (1 - \alpha) \bar{X}_{t+1} \quad (3.1)$$

Kde X jsou hodnoty reálné poptávky a \bar{X} je vypočtena podle vzorce (3.2):

$$\bar{X}_{t+1} = \frac{X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + X_{t-3}}{4} \quad (3.2)$$

Tato úprava vede v některých případech ke zvýšení přesnosti modelu než v případě modelu ES, nicméně opět zde platí, že velmi záleží na typu poptávky a na samotných hodnotách v dané poptávce.



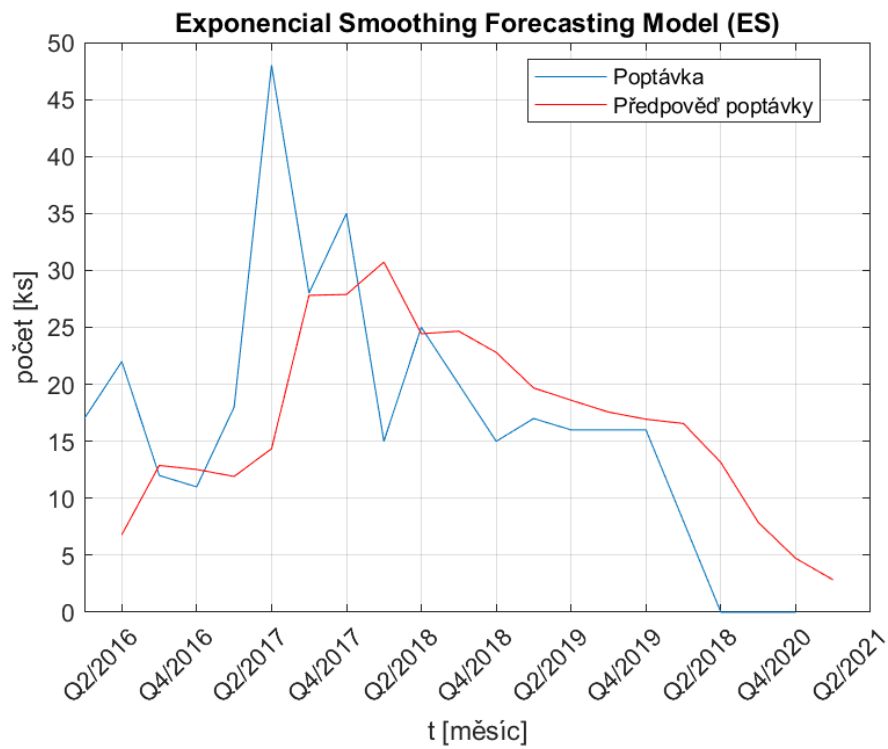
Obrázek 5 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu ESMA

Model ES nepracuje s průměrnými hodnotami, ale využívá předchozí predikovanou hodnotu, jak vidíme ve vzorci (3.3).

$$Xf_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)Xf_t \quad (3.3)$$

Vykreslení poptávky a předpovědi poptávky podle tohoto vzorce vidíme na Obrázku 6.

[10]



Obrázek 6 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu ES

4.3 Brown's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (BDES)

Brown's Double Exponential Smoothing, také známo jako Brown's Linear Exponential Smoothing, je druhem dvojitého exponenciálního vyhlazování (smoothing), které oproti modelu ES využívá dvě rozdílně vyhlazené řady dat, které mají svůj střed v odlišných časových bodech. Nicméně k tomuto výpočtu model BDES stále potřebuje jen jednu smoothing konstantu – *alpha* (α). Vzorec pro výpočet předpovědi na další časový okamžik $t+1$ je založen na dvou extrapolovaných řadách, které mají odlišné středy. Vykreslení předpovědi modelem BDES je na Obrázku 7. Hodnotu $S1$ vypočteme podle rovnice (4.1) a označuje řadu po prvním vyhlazení, kdy je exponenciální vyhlazení aplikováno přímo na řadu s reálně naměřenými hodnotami X . $S2$, jehož výpočet je uveden ve vzorci (4.2), poté označuje řadu druhého vyhlazení, které využívá stále stejnou smoothing konstantu, ale toto vyhlazení je aplikováno na řadu hodnot $S1$. Podle vzorce (4.3) vypočteme predikci Xf :

$$S1_0 = X_{t=0}$$

$$S2_0 = X_{t=0}$$

$$S1_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)S1_{t-1} \quad (4.1)$$

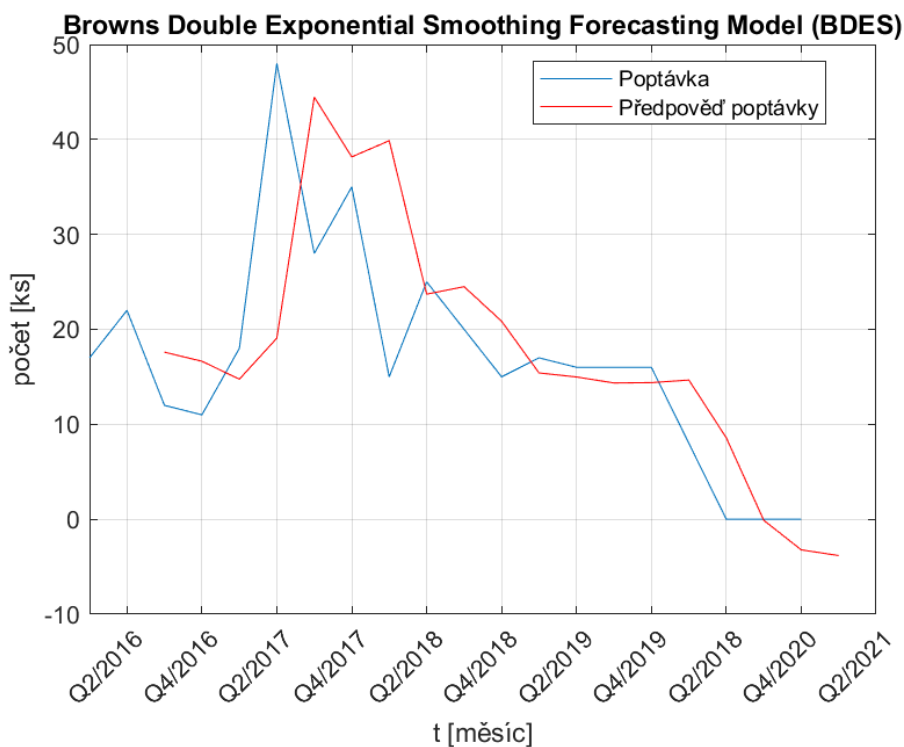
$$S2_t = \alpha S1_t + (1 - \alpha)S2_{t-1} \quad (4.2)$$

$$Xf_{t+1} = L_t + T_t \quad (4.3)$$

Pro výpočet samotné predikce, však ještě potřebujeme hodnotu L_t (4.4), která vyjadřuje odhadovanou hladinu poptávky v čase t a také hodnotu T_t (4.5) vyjadřující odhadovaný trend poptávky v čase t . [11]

$$L_t = 2S1_t - S2_t \quad (4.4)$$

$$T_t = \frac{\alpha}{1 - \alpha}(S1_t - S2_t) \quad (4.5)$$



Obrázek 7 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu BDES

4.4 Holt's Double Exponential Smoothing Forecasting Model (HDES)

Podobně jako je tomu u modelu BDES, i Holtova úprava exponenciálního vyhlazování vede k zprávnění výsledků pro některé druhy poptávky. Dále se stejně jako BDES i model HDES hodí i pro jiné druhy poptávek nežli jen *Smooth demand*. Poměrně dobré výsledky má tento model v případě *Erratic* a *Intermittent demand*. Čím se ovšem od modelu BDES liší, je využití dvou smoothing konstant – α (α) a β (β). Zatímco α určuje spíše hladinu předpovídané poptávky, β se v obdobné formě věnuje trendu poptávky. Stejně jako je tomu u první konstanty, i zde platí $0 \leq \beta \leq 1$. U tohoto modelu je tedy možné předpověď nastavit pomocí dvou konstant, čímž můžeme model HDES lépe upravit tak, aby předpovídal co nejpřesnější předpovědi. Přesnosti výsledků modelů se věnuje sedmá kapitola této diplomové práce, nicméně jen v krátkosti můžeme uvést, že nastavení smoothing konstant probíhá právě na základě chybovosti, respektive přesnosti modelu. Pro nejpřesnější výsledky je tedy nutné několikrát model nechat spočítat předpovědi, vždy s jinými smoothing konstantami a dle přesnosti poté vybrat nejvhodnější α a β . Mezi hlavní výhody tohoto modelu řadíme možnost aplikovat ho i na jiné druhy poptávek než jen *Smooth demand*.

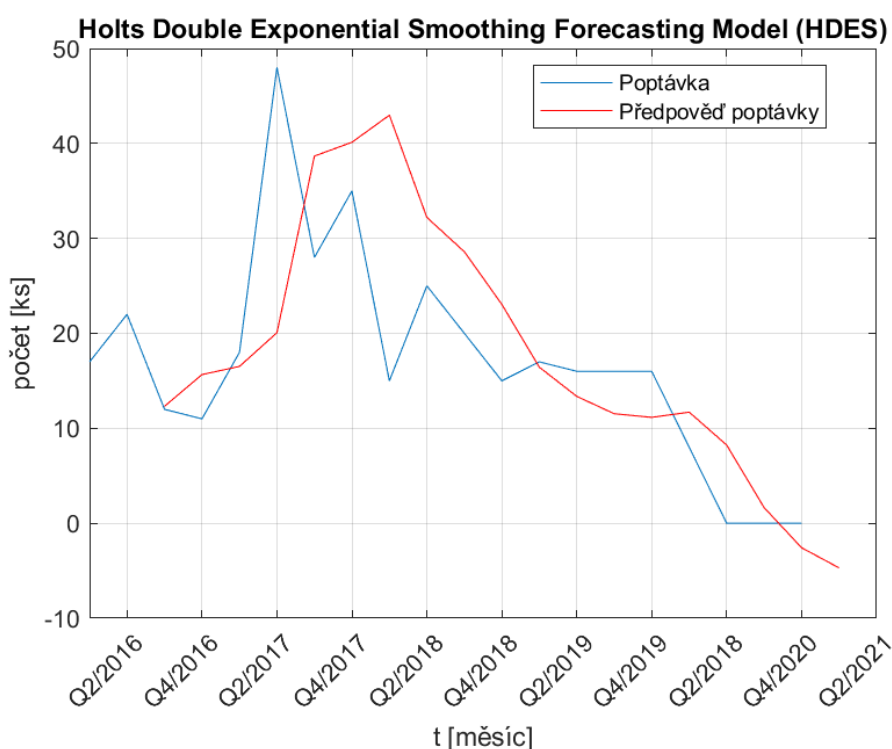
Na druhou stranu tento model vyžaduje manuální nastavení dvou konstant pro vyhlazování, k čemuž je nutný jistý čas pracovníka. Pokud by se software dále rozpracoval a bylo by umožněno, aby pro každý model sám volil nejvhodnější vyhlazovací konstanty, efektivita predikce by se spolu s její přesností ještě zvýšila.

Předpovědi poptávky Xf v čase $t+1$ dostaneme pomocí vzorce (5.1) a jsou pro názornost uvedeny na Obrázku 8. Stejně jako v předchozím případě je pro tento vzorec nutné spočítat i rovnici pro L_t (5.2), díky které získáme odhadovanou hodnotu hladiny předpovědi v čase t a také rovnici T_t (5.3), ze které získáme hodnotu odhadovaného trendu v čase t . [12]

$$Xf_{t+1} = L_t + T_t \quad (5.1)$$

$$L_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (5.2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (5.3)$$



Obrázek 8 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu HDES

4.5 Holt-Winters Exponential Smoothing Forecasting Model (HWES)

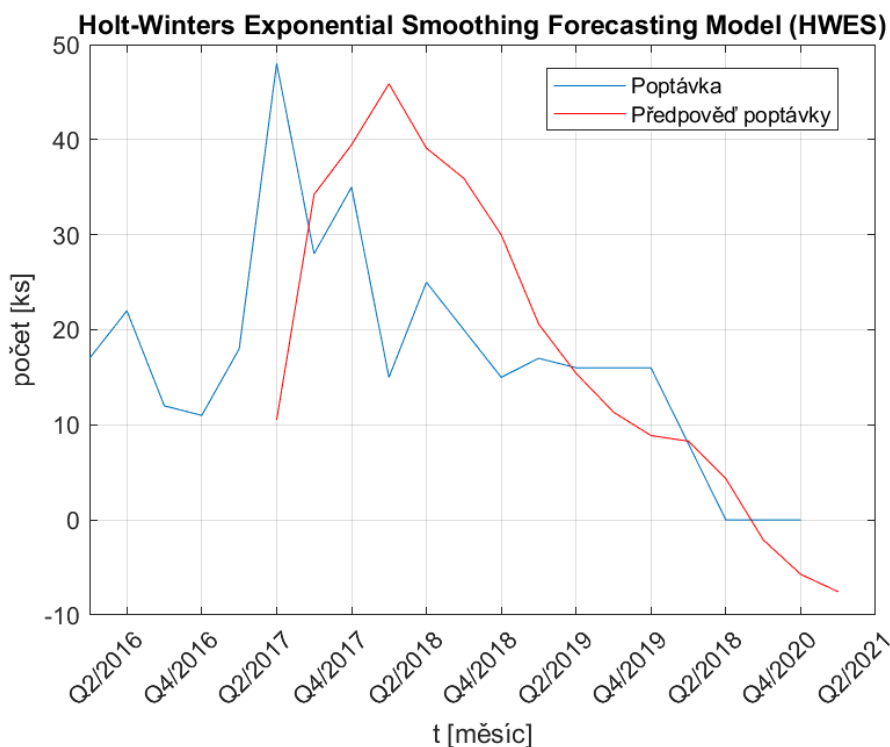
Dalším významnějším posunem v oblasti předpovědí poptávky, které vykazují jistou sezónnost, je Holt-Winters Exponential Smoothing Forecasting Model – zkráceně HWES. Příklad vykreslení předpovědi poptávky tímto modelem je na Obrázku 9. Tento model rozšiřuje dvojité vyhlazování na trojitě. I proto v literatuře můžeme nalézt model HWES označován jako Triple Exponential Smoothing. Do výpočtů zde k předchozím dvěma smoothing konstantám (α a β) přibývá třetí – gamma (γ) pracující se sezónností. Hodnoty pro tuto smoothing konstantu jsou definované jako $0 \leq \gamma \leq (1 - \alpha)$. Z empirického zkoušení modelu na datech poskytnutých CSAT, vykazuje model největší přesnost pokud $\gamma < 0.1$. Společně s další vyhlazovací konstantou je potřeba i třetí rovnice pro výpočet předpovědi Xf v čase $t+1$ (6.1). K již výše popsaným hodnotám L_t a T_t , které pro model HWES vypočteme podle rovnice (6.2), respektive podle (6.3), přibývá ještě nutnost výpočtu S_t , který modelu pomáhá vyřešit otázku odhadu sezónnosti a jehož výpočet je uveden v rovnici (6.4). HWES lze aplikovat dvojným způsobem, v této diplomové práci se však věnuji jen jednomu způsobu, který bychom v literatuře našli pod názvem Holt-Winters' Additive Method, jelikož tato metoda je vhodnější pro poptávky, které vykazují pravidelnou sezónnost. V rovnicích se objevuje navíc ještě neznámá m , která udává pravidelnost sezónnosti. Jelikož modely pracují s poptávkou vždy pro celá čtvrtletí, je v modelu HWES nastavena hodnota $m = 4$. Mezi největší nevýhody tohoto modelu bychom mohli zařadit nutnost nastavovat hned tři smoothing konstanty, což může být relativně zdlouhavý proces, který by v běžném provozu pracovníky jen zdržoval. Při jednotně nastavených hodnotách, pak musíme počítat s tím, že model nebude využit na své maximum, nicméně pokud jednou konstanty přednastavíme optimálně, můžeme dosáhnout přijatelných výsledků pro většinu druhů poptávek. [12]

$$Xf_{t+1} = L_t + T_t + S_{t-m} \quad (6.1)$$

$$L_t = \alpha(X_t - S_{t-m}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (6.2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (6.3)$$

$$S_t = \gamma(X_t - L_{t-1} - T_{t-1}) + (1 - \gamma)S_{t-m} \quad (6.4)$$



Obrázek 9 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu HWES

4.6 Croston's Forecasting Model (CROSTON)

Croston's Forecasting Model (CROSTON) vznikl v důsledku potřeby predikovat především poptávky typu *Intermittent demand*. Za vznikem tohoto modelu stály tři jednoduché kroky. Prvním je vyhodnocení průměrné hladiny poptávky kdykoli, kdy je poptávka větší než nula. Druhým krokem je vyhodnocení průměrného času mezi dvěma časovými intervaly s nenulovou hodnotou poptávky. Posledním krokem je pak samotná předpověď hodnot poptávky, přesněji hladiny poptávky, která je vynásobena pravděpodobností toho, že bude poptávka nenulová. Crostonův model pracuje s pouze jednou smoothing konstantou, kterou je α .

Pokud zůstává reálná poptávka po delší časová období rovna nule, model CROSTON není schopný pro další kroky upravovat svou předpověď, která tedy zůstává stejná, jak je vidět z rovnice (7.1) pro výpočet predikce X_f v čase $t+1$. Predikce spolu s reálnou poptávkou je vykreslena na Obrázku 10. Tento způsob předpovědi je řazen mezi hlavní nevýhody tohoto modelu. Druhou nevýhodou tohoto modelu může být jeho „positive bias“, tedy že jeho předpovědi jsou obecně mírně nadhodnocené, tedy pozitivně zaujaté. Jak je popsáno v předchozím odstavci, pro výpočet predikce je nutné určit hladinu poptávky L_t , kterou pro nulovou hodnotu skutečné poptávky v předchozím časovém okamžiku vidíme ve vzorci (7.2). Druhým krokem je pak pro opět nulovou

poptávku v předchozím časovém intervalu výpočet periodičnosti P_t podle vzorce (7.3), tedy průměrného času mezi dvěma nenulovými poptávkami. Ze vzorců i z textu vyplývá, že Crostonovu modelu velmi záleží na tom, zdali je poslední naměřená hodnota v čase t rovna nule, nebo zdali je větší než nula. V modelu také vystupuje veličina q , která slouží jako prosté počítadlo intervalů, které model počítá od posledního intervalu s nenulovou poptávkou. [18]

$$\text{Když } X_t = 0, \text{ pak:} \quad Xf_{t+1} = X_t \quad (7.1)$$

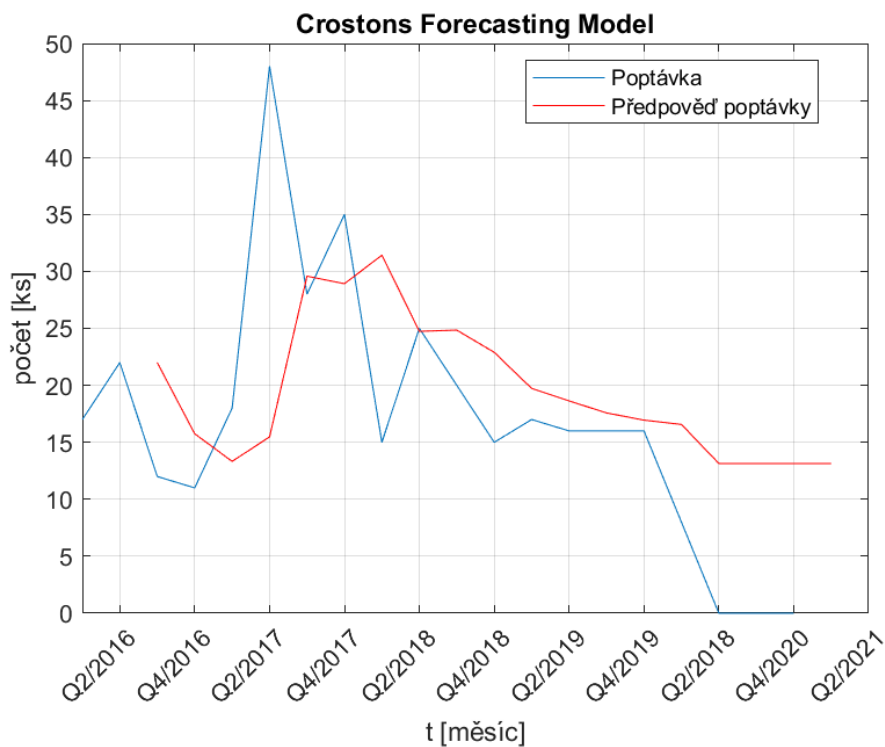
$$L_{t+1} = L_t \quad (7.2)$$

$$P_{t+1} = P_t \quad (7.3)$$

$$\text{Když } X_t > 0, \text{ pak:} \quad Xf_{t+1} = \frac{L_t}{P_t} \quad (7.4)$$

$$L_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)L_t \quad (7.5)$$

$$P_{t+1} = \alpha q + (1 - \alpha)P_t \quad (7.6)$$



Obrázek 10 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu CROSTON

4.7 Syntetos-Boylan Approximation Forecasting Method (SBA)

Syntetos-Boylan Approximation Forecasting Method (SBA) je prvním z celkově dvou optimalizací a zpřesnění Crostonova modelu. Tato metoda se od modelu CROSTON liší jen velmi mírně. Využívá totiž jiné korekce, která měla odstranit mírný nedostatek v modelu CROSTON a to jeho „positive bias“, která je popsána výše. Změny se tedy projevují pouze v rovnici (8.1), ze které jednotně počítáme předpověď poptávky v čase $t+1$. Stejně jako je to u Crostonova předpovědního modelu k výpočtu jsou potřeba hodnoty pro L_t i pro P_t . Ty zůstávají shodné s modelem CROSTON, a tedy jsou rozdílné pro případ, kdy je hodnota skutečné poptávky za předchozí časový interval rovna nule (8.2) a (8.3) a kdy je naopak poptávka kladná (8.4) a (8.5). Obrázek 11 znázorňuje příklad vykreslení predikce poptávky modelem SBA. [13]

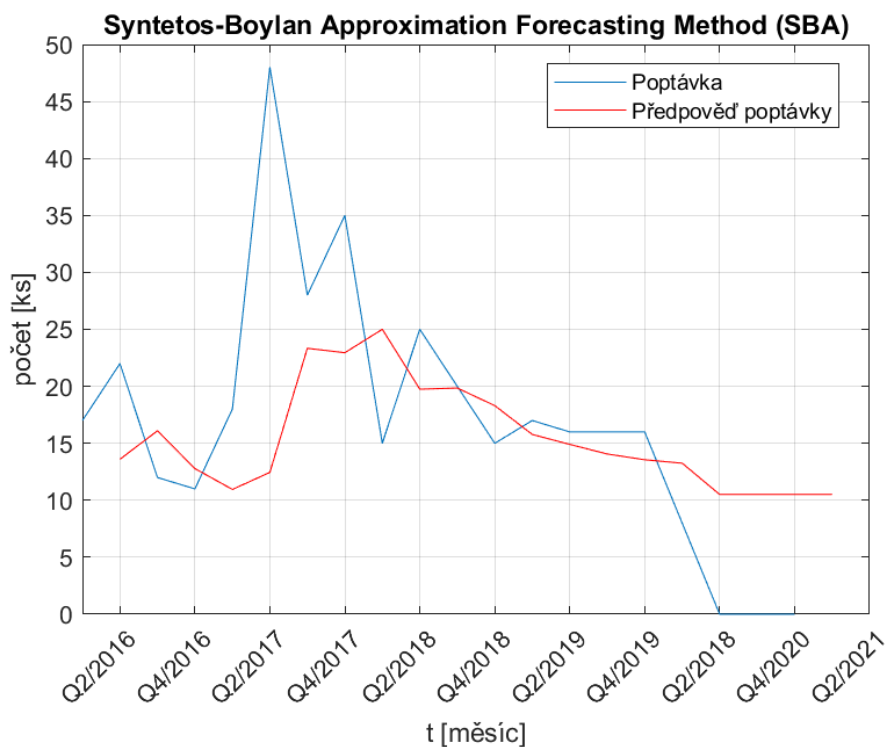
$$Xf_{t+1} = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{L_{t+1}}{P_{t+1}} \quad (8.1)$$

$$\text{Když } X_t = 0, \text{ pak:} \quad L_{t+1} = L_t \quad (8.2)$$

$$P_{t+1} = P_t \quad (8.3)$$

$$\text{Když } X_t > 0, \text{ pak:} \quad L_{t+1} = L_t + \alpha(X_t - L_t) \quad (8.4)$$

$$P_{t+1} = P_t + \alpha(q - P_t) \quad (8.5)$$



Obrázek 11 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu SBA

4.8 Teunter-Syntetos-Babai Forecasting Method (TSB)

Poměrně zásadní úprava Crostonova předpovědního modelu přišla v roce 2011, kdy byl představen Teunter-Syntetos-Babai Forecasting Method (TSB) nesoucí ve svém názvu jména tří vědců, kteří tento model navrhli. Hlavním cílem bylo odstranit největší nevýhodu modelu CROSTON, kterou je jeho neschopnost upravovat hodnoty předpovědi v čase $t+1$, $t+2$, ..., $t+n$, pokud je reálná poptávka X v čase t rovna nule. Přesněji chtěli docílit toho, aby se model aktualizoval, a tedy snížil svou periodičnost i pokud je právě reálná poptávka $X_t = 0$. Tohoto cíle bylo nakonec dosaženo a model TSB je tedy schopný pracovat se všemi druhy poptávky a také získal výhodu především pro poptávky typu *Intermittent* nebo *Lumpy*, jelikož je schopný aktualizovat a upravovat své předpovědi i pokud se reálná poptávka v čase t rovná nule, což je zejména u těchto druhů poptávky poměrně častý jev. Pokud bychom srovnali předpověď TSB a například ES, budou si poměrně hodně podobné, nicméně hlavní rozdíl tkví v tom, že model TSB je schopný pracovat jak s hladinou poptávky, tak zároveň i s pravděpodobností výskytu poptávky. Model ES je totiž v tomto případě schopný pracovat jen a pouze s hladinou poptávky. Pro výpočet předpovědi X_f v čase $t+1$ využívá model TSB stejně jako CROSTON hladinu poptávky L_t a periodičnost P_t . Rovnice (9.1) se, pro určení $X_{f_{t+1}}$, se oproti modelu CROSTON změnila a dochází k ní

k vynásobení hladiny poptávky a periodičnosti, obě hodnoty v čase $t+1$. V případě hladiny poptávky se oproti Crostonovu modelu rovnice pro její výpočet nemění a zůstávají totožné (9.2). Změny nastávají také při výpočtu periodicity, což je zřejmé z rovnice (9.3), jestliže byla skutečná poptávka v daný časový okamžik rovna nule. Pro případ kladné poptávky X v čase t , poté platí rovnice (9.4) pro výpočet hladiny poptávky a (9.5) pro výpočet periodicity. Další změnou oproti modelu CROSTON je využití dvou vyhlazovacích konstant, a to $alpha$ a $beta$, které mohou působit prodlevy při jejich optimálním nastavení. Na Obrázku 12 je vykreslená předpověď poptávky, jež byla vypočtena modelem TSB. [13]

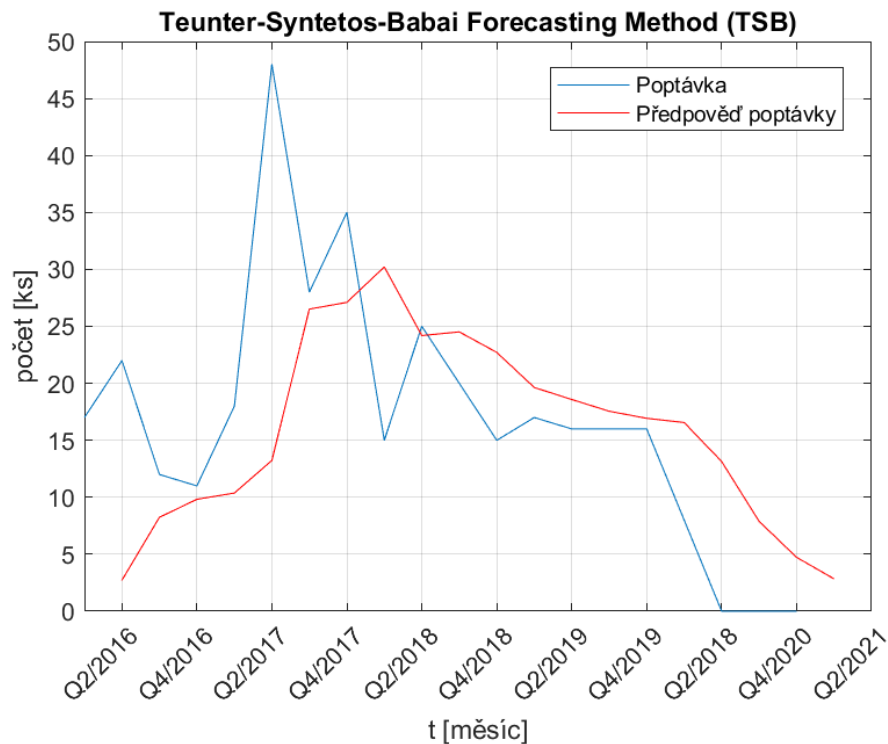
$$Xf_{t+1} = P_{t+1}L_{t+1} \quad (9.1)$$

$$\text{Když } X_t = 0, \text{ pak:} \quad L_{t+1} = L_t \quad (9.2)$$

$$P_{t+1} = (1 - \beta)P_t \quad (9.3)$$

$$\text{Když } X_t > 0, \text{ pak:} \quad L_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha)L_t \quad (9.4)$$

$$P_{t+1} = \beta + (1 - \beta)P_t \quad (9.5)$$



Obrázek 12 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu TSB

4.9 Grey System Forecasting Model (GM)

Grey System Forecasting Model (GM) volí pro předpověď poptávky v čase $t+1$ zcela jiný přístup než veškeré výše zmíněné modely, jak lze vidět na Obrázku 13. „Grey System“ je takový systém, u něhož je možné jím poskytnuté informace rozdělit na dvě sady. První z nich jsou informace, které jsou známé, druhá sada jsou pak informace neznámé. Celá teorie „šedého systému“ je založena na tom, že z většího celku, kterým je například neznámý funkční mechanismus, jsou vybírány jeho ne zcela jednoznačné dílky nebo části, které jsou v běžných matematických modelech jen těžko kvantifikovatelné. Model poté určuje jednotlivé parametry diferenčních rovnic tím, že aplikuje data z časových řad. Šedá předpověď se oproti ostatním modelům, které jsou zmíněné v této diplomové práci, nedívá na poskytnutá data ze stochastického pohledu, nýbrž na tato data nahlíží jako na šedý systém, který je složen z dalších dílků, které se s časem mění. Pokud model GM označíme jako $GM(1,1)$, jedná se o systém prvního řádu o jedné neznámé. Velkou výhodou modelu GM je absence jakýchkoliv smoothing konstant, tedy model se nemusí nikterak nastavovat, což je samozřejmě vhodné pro použití v organizaci oprávněné k údržbě. Jako nevýhodu je možné uvést fakt, že model GM své předpovědi zásadně neupravuje a v každý časový okamžik tak dostáváme hodnoty, které se v čase nemění tak razantně jako u jiných modelů. Nicméně, jak je popsáno

níže, přesnost tohoto modelu je i ve srovnání s ostatními nadprůměrná. Výsledek z šedého systému je uveden v rovnici (10.1) a získáme ho z řešení diferenčních rovnic.

$$Xf^{(1)}(k) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] * e^{-a(k-1)} + \frac{u}{a} \quad (10.1)$$

K tomuto výpočtu je potřeba znalost celé řady dalších veličin. Začneme s originálními daty z databáze, jejichž množinu transponujeme a označíme jako $X^{(0)}$ (10.2).

$$X^{(0)} = (X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)) \quad (10.2)$$

Dále ustanovíme $X^{(1)}$ jakožto číselnou řadu 1-AGO, kde $X^{(1)} = AX^{(0)}$ a $z^{(1)}(k) = 0.5X^{(1)}(k-1) + 0.5X^{(1)}(k)$. Jestliže srovnáme $X^{(0)}$ a $X^{(1)}$ zjistíme, že právě hodnoty prvků v $X^{(1)}$ postupně rostou. Právě tyto hodnoty jsou dále důležité ke správnému výpočtu GM.

Nechť je rovnice (10.3) definicí modelu GM(1,1):

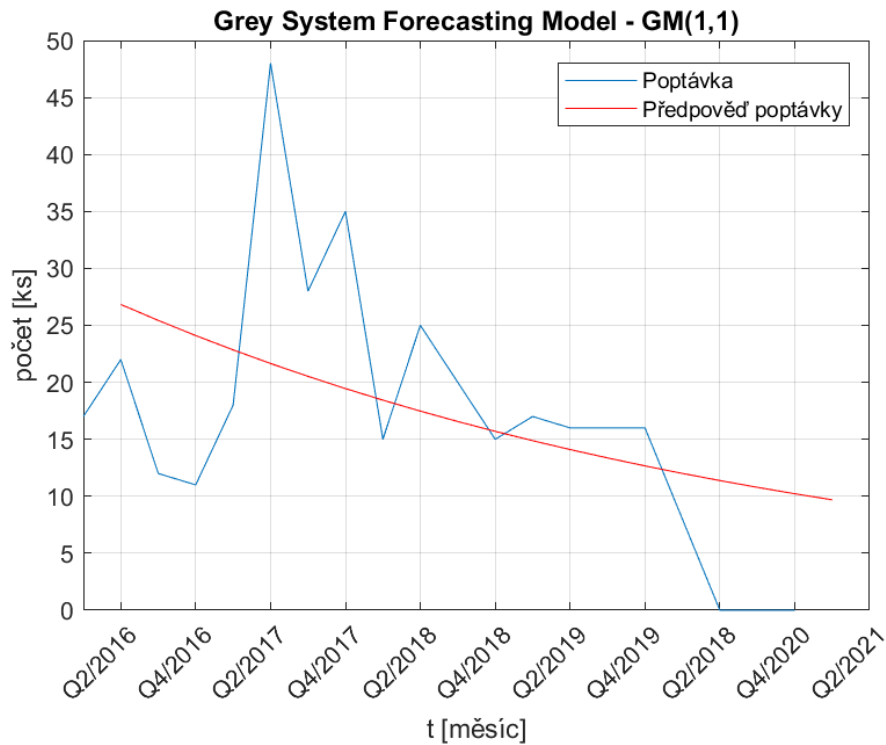
$$X^{(0)}X^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = u \quad (10.3)$$

V této rovnici mohou hodnoty k nabývat hodnot 2 až n . Veličina a je tzv. „Development coefficient“ a veličina b je takzvaný „šedý vstup“ modelu.

Druhou definicí modelu GM(1,1) může být rovnice (10.4):

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (10.4)$$

Pokud se stanoví počáteční podmínky na $X^{(1)}(1) = X^{(0)}(1)$, pak vyjde rovnice (10.4), pomocí které se již dostaneme k výsledkům. [14]



Obrázek 13 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu GM(1,1)

5 Výpočet chyb a Tracking Signal

V této kapitole jsou v krátkosti představeny veškeré metriky, se kterými je operováno jak v uživatelském prostředí programu MATLAB, tak při vyhodnocení výsledků. V této diplomové práci jsou využity chyby relativní, sloužící k porovnání celkových výsledků přesnosti modelů vztáhnuté na všechna P/N. Absolutní chyby pak slouží při vyhodnocení přesnosti předpovědi pro jednotlivá P/N, zejména v rámci grafického uživatelského prostředí, které je součástí vytvořeného programu.

5.1 Relativní chyby

Pro poskytnutá data a vybrané modely bylo vytvořeno relativní porovnání přesnosti za pomoci Symmetric Mean Absolute Percentage Error (SMAPE). Díky této procentuální chybě, která je nezávislá na vlastních hodnotách poptávky (tzv.: „Scale-free“), bylo možné analyzovat přesnost jednotlivých modelů, a navíc je porovnávat navzájem. V dnešní době již existuje několik rovnic, kterými lze SMAPE vypočítat. V této diplomové práci je použita rovnice (11.1), ze které mohou vzejít výsledky mezi 0 % a 100 %. Maximální přesnosti modelu je dosaženo tehdy, kdy $SMAPE = 100$ (%).

$$SMAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{|x_i| + |\hat{x}_i|} [\%] \quad (11.1)$$

Kde x je hodnota skutečné poptávky, \hat{x} je hodnota predikované poptávky a n je počet dat, tedy počet P/N. Podobně jako je tomu i u jiných procentuálních chyb, problém nastává, pokud $x = \hat{x} = 0$, kdy dostáváme ve výsledku nulu. [19]

5.2 Absolutní chyby

První metrikou, která je nezávislá na vlastních hodnotách poptávky, je například Mean Absolute Scaled Error (MASE). Tento druh chyby byl navrhnout Hyndmanem a Koehlerem teprve v roce 2006. I přesto je tento typ možnosti měření přesnosti předpovědi možné použít takřka na jakýkoli model s jakýmkoli daty. K výpočtu je třeba pracovat se „Scaled Error“ e_s , ze které je možné získat výsledek nezávislý na vstupních datech, tedy tuto metriku lze použít k porovnání modelů s různými vstupními daty. [19]

Pokud e_s je menší než jedna, pak model předpovídá přesněji, než kdyby byla použita průměrná jednokroková předpověď metody pojmenované jako Naïve Forecast Method². Právý opak pak platí pro hodnoty $e_s > 1$. Vzorec pro výpočet „Scaled Error“ vidíme z rovnice (11.2). Samotný výpočet MASE je pak jednoduchý a vidíme ho na rovnici (11.3):

$$e_s = \frac{x_i - \hat{x}_i}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |x_i - x_{i-1}|} \quad (11.2)$$

$$MASE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_s| \quad (11.3)$$

Porovnání jednotlivých výsledků pomocí MASE bylo do této diplomové práce zařazeno na základě doporučení autorů několika článků³, kteří naléhají na rozšířenější využívání MASE při vyhodnocování přesnosti předpovědí různých k tomu určených modelů. Nezanedbatelnou výhodou MASE je možnost také ji využít na takřka všech předpovědních modelech, nezávisle na vstupních datech. I díky těmto výhodám je MASE začleněna mezi metriky vyhodnocující přesnost předpovědních modelů [19]

Jakmile metriky pracují s chybou, případně absolutní chybou modelu, jde o přesný opak „Scale-free“ metrik, a tedy se jedná o „Scale-dependant“ metriky. U nich vychází vyhodnocení měření přímo z chyb modelu a pro porovnání těchto metrik musíme použít vždy stejný vzorek dat. V současnosti je tento typ metrik vůbec tím nejrozšířenějším pro měření kvality odhadu, a proto jsou i v této diplomové práci některé metriky tohoto typu použity.

Pravděpodobně tou nejvíce známou a nejrozšířenější metrikou je Root Mean Squared Error (RMSE), v češtině se používá označení odmocnina ze střední kvadratické chyby. V této práci jsem k porovnání predikcí použil hodnoty RMSE jednotlivých modelů. RMSE se vypočte podle následujícího vztahu (11.4).

² Naïve Forecast Method – Předpovědní metoda, která za svou předpověď v čase $t+1$ bere data v čase t a to bez jakýchkoliv úprav.

³ HYNDMAN, Rob J. a KOEHLER, Anne B. – Another Look at Measures of Forecast Accuracy;
FRANCES, Philip Hans – A Note on the Mean Absolute Scaled Error;
SYNTETOS, A.A. a BOYLAN, J.E. – The Accuracy of Intermittent Demand Estimates

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (11.4)$$

Kde x je hodnota skutečné poptávky, \hat{x} je hodnota predikované poptávky a n je počet dat. RMSE má však i své nevýhody. Již ze vzorce lze vyčíst tu největší, jež spočívá ve výsledné hodnotě, která je poměrně silně ovlivněna případnými velkými dílčími hodnotami. O této metrice tedy říkáme, že je pesimistická, neboť máme-li sto členů a jen jeden z nich bude nabývat vysokých hodnot (například 400) a zbytek bude roven jedné, pak celková hodnota RMSE bude vycházet přibližně čtyřicet. RMSE se tedy soustředí na špatné odhady, i když se ve velké množině relativně přesných předpovědí nachází třeba jen jeden odhad nepřesný. [15]

5.3 Tracking Signal

Jako druhý ukazatel pro posouzení přesnosti a vhodnosti jednotlivých modelů byl zvolen Tracking Signal (TS). TS přesněji ukazuje, zdali je předpověď schopna držet krok s náhlými změnami v poptávce. Jde tedy o nástroj používaný k určení, vhodnosti daného předpovědního modelu vzhledem k danému typu poptávky, případně k samotným datům poptávky. TS indikátor poskytuje průběžné hodnoty, je tedy možné přesně vidět, kdy se model dostává se svou předpovědí mimo jisté limity. To je jednou z výhod použití TS, společnost využívající TS si může dané limity nastavit sama a poté sledovat překročení nastavených limitů. Tato situace indikuje odklonění předpovědi od skutečných hodnot a upozorňuje tak, na nepřesnost předpovědního modelu.

Výpočet TS probíhá dle vztahu (11.7), kde v čitateli figuruje hodnota Running Sum of Forecast Errors (RSFE) a ve jmenovateli je hodnota průměrné absolutní odchylky (MAD). MAD může být v literatuře označována i jako Mean Absolute Error (MAE). Z tohoto důvodu jsou i v této diplomové práci označení MAD a MAE považovány za totožné. RSFE tedy postupně sčítá jednotlivé chyby předpovědi, jak je vidět v rovnici (11.5). Naproti tomu průměrná MAD v každém kroku sčítá absolutní chyby k danému kroku a poté výsledek dělí aktuálním počtem kroků, což je vidět ve vzorci (11.6). Jak lze vyčíst ze vzorců, hodnoty RSFE, MAD i TS získáváme po každém časovém intervalu daného modelu. Toto zaručuje výše zmíněné průběžné hodnoty pro kontrolu přesnosti modelu.

$$RSFE = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i) \quad (11.5)$$

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (11.6)$$

$$TS = \frac{RSFE}{MAD} \quad (11.7)$$

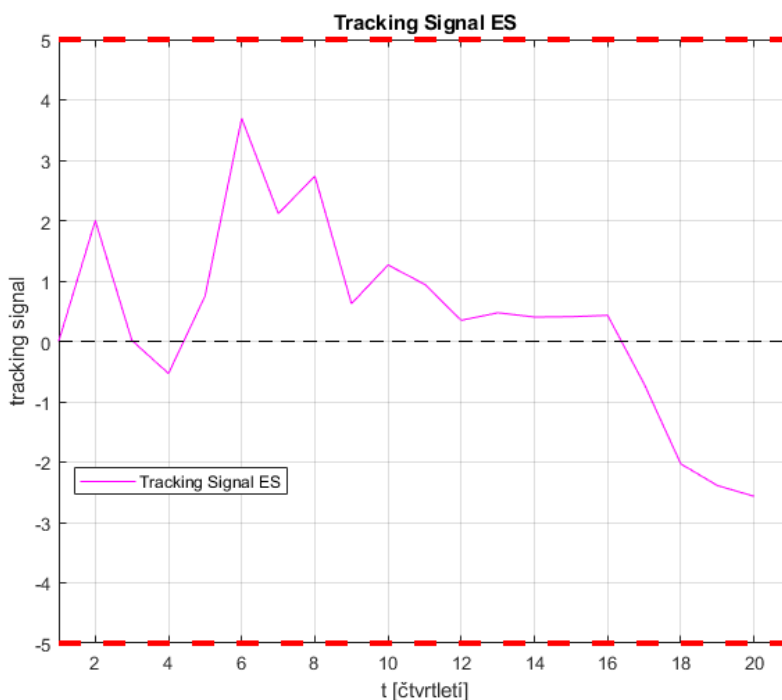
Jak již bylo naznačeno, každá společnost si pak může nastavit jisté hranice maximálních hodnot TS. Jakmile jsou tyto limity TS překročeny, je to pro uživatele signál, že se v daný časový interval model svou předpovědí příliš odchýlil od skutečně naměřených hodnot. Dané hranice jsou individuálně voleny především v závislosti na vstupních datech od modelu. Pokud se jedná o konzistentní data, lze předpokládat, že se model nebude příliš vychylovat a hranice TS mohou být nastaveny na nižší hodnoty. Nejčastěji jsou limity voleny mezi hodnotami ± 2 a ± 5 . Nicméně pokud model pracuje s daty, která jsou nekonzistentní a existuje velká variace mezi jednotlivými prvky dat, pak i model nebude schopný předpovídat hodnoty přesně, a tedy hodnoty TS se budou pohybovat ve vyšších hodnotách. Každá společnost si pak musí vyhodnotit, jaké hranice TS jsou pro ni přijatelné.

V této diplomové práci jsou stanoveny hranice na ± 5 , jelikož data nejsou v každém typu poptávky konzistentní. Pro demonstraci TS je tato hranice optimální a není nutné jí stanovovat na nižší číselné hodnoty. Jestliže by ovšem organizace chtěla stanovit jiné hranice TS, je to samozřejmě možné na základě zkušenosti a dat společnosti. Výhody použití TS jakožto metody pro vyhodnocení kvality předpovědi je především v jeho nezaujatosti a také v tom, že pro jeho výpočet není potřeba mnoho dat. K výpočtu postačují jen dvě hodnoty a těmi jsou skutečná a předpovídaná poptávka pro daný okamžik. S tím je spojena i další výhoda, a tou je všestrannost TS, kdy ho můžeme aplikovat na širokou škálu předpovědních modelů a ověřovat si tak jejich kvalitu a případné nastavení modelu. Na druhou stranu samozřejmě existují i nevýhody spojené s použitím TS. První je zakořeněná v samotném výpočetním vzorci. Z něj je patrné, že TS vždy počítá s chybou předpovědního modelu a tedy, jakmile se předpověď příliš blíží skutečné hodnotě dat v daném časovém intervalu, pak má TS tendence v tomto časovém intervalu narůstat k nekonečnu. Druhou nevýhodou může být nesprávná indikace špatných předpovědí (překročení hranice TS), pokud model

predikuje hodnoty pouze s malými odchylkami, a to stále v jednom směru. Nicméně v obou případech stačí prověřit skutečná a predikovaná data v daném časovém okamžiku a snadno tak odhalit chybné překročení hranic TS. [20]

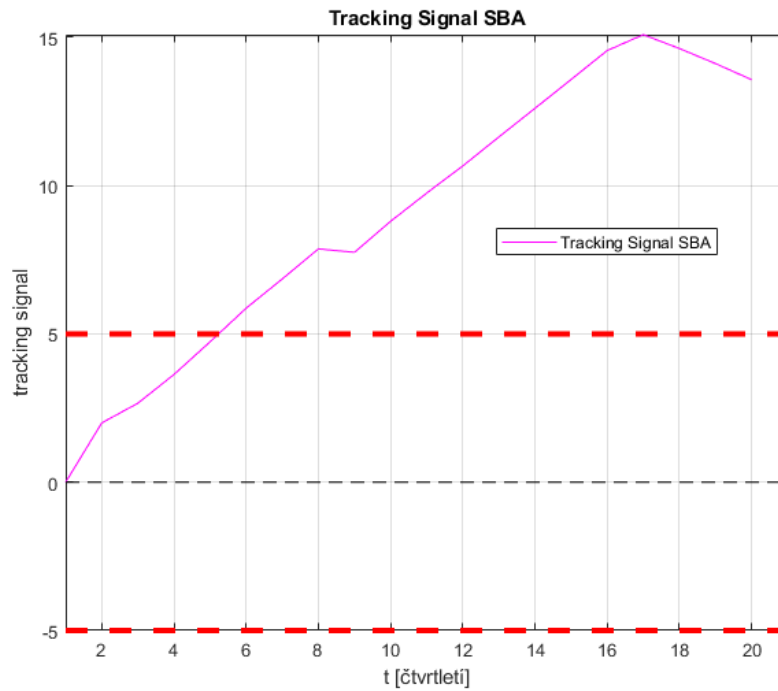
TS může být použito, podobně jako SMAPE, v případech, kdy je potřeba ověřit vhodnost modelu. Pokud aplikujeme TS na data, která představují hodnoty poptávky, což je i případ této diplomové práce, může být rychlým pohledem na graf TS vyhodnoceno, zdali budou na skladě díly přebývat nebo jich tam bude nedostatek. Princip je takový, že pokud bychom díly naskladňovali dle předpovědí modelu a jejich odbyt by byl počítán z reálné poptávky daného časového intervalu, TS bude inverzně kopírovat trend kupení nebo nedostatku dílů na skladě. Jakmile se bude TS pohybovat mimo dané hranice, tedy se jeho hodnoty nebudou pohybovat blízko hodnoty rovné nule, díly se na skladě budou kupit a obráceně. I to je důvod, proč v tomto případě požadujeme, aby se graf vývoje TS držel blízko nuly, tj., na skladě se díly nebudou ani kupit, ani jich nebude nedostatek.

Na Obrázku 14 je příklad výřez z GUI s vykreslením TS, který se v celém intervalu svých hodnot drží uvnitř hranice ± 5 . Pro toto vykreslení grafu byl opět využit materiál P/N 5, kdy byl aplikován model ES s nastavením $\alpha = 0.8$.



Obrázek 14 - Vykreslení TS pro vhodně nastavený model (P/N 5)

Naopak na Obrázku 15 vidíme totožný výřez z GUI, kde je vykreslený TS, který vysoce překračuje stanovené hranice ± 5 . Byť jde o vhodný model pro daný typ poptávky, byla zde nastavena smoothing konstanta *alpha* na $\alpha = 0.8$, což zapříčinilo odchýlení TS od nulové osy.

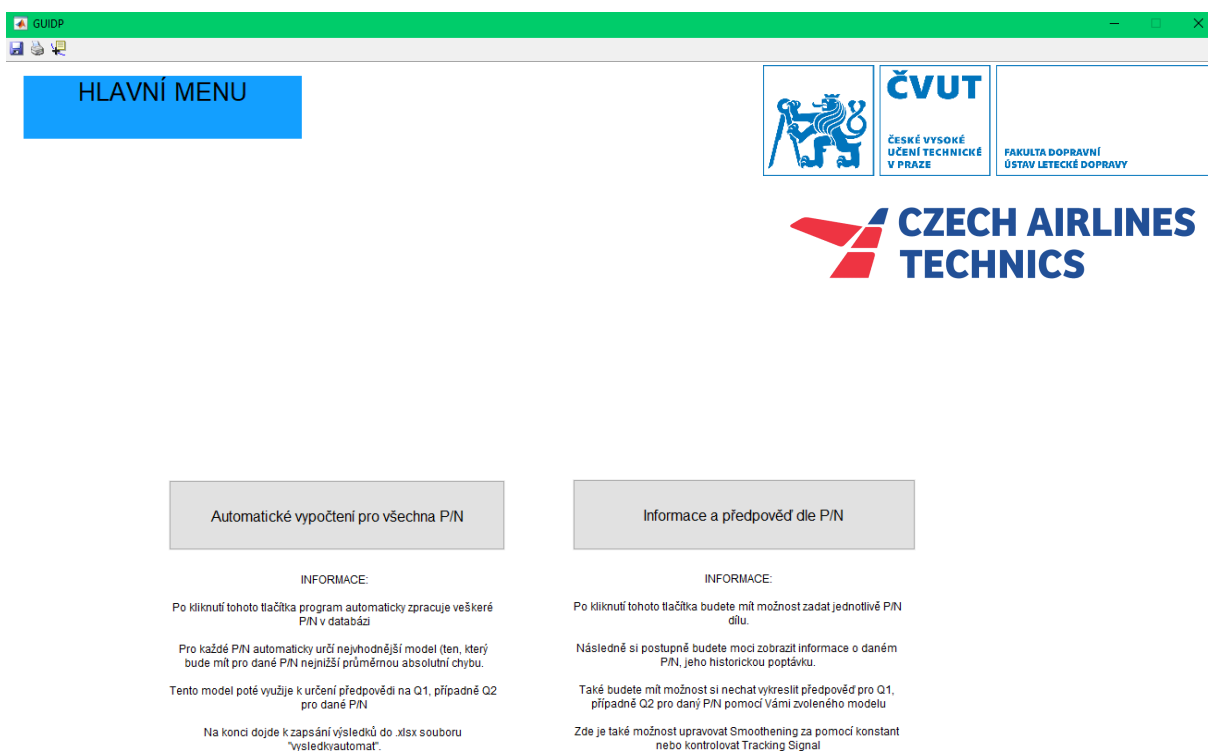


Obrázek 15 - Vykreslení TS pro nevhodně nastavený model (P/N 5)

6 Program a uživatelské prostředí v programu MATLAB

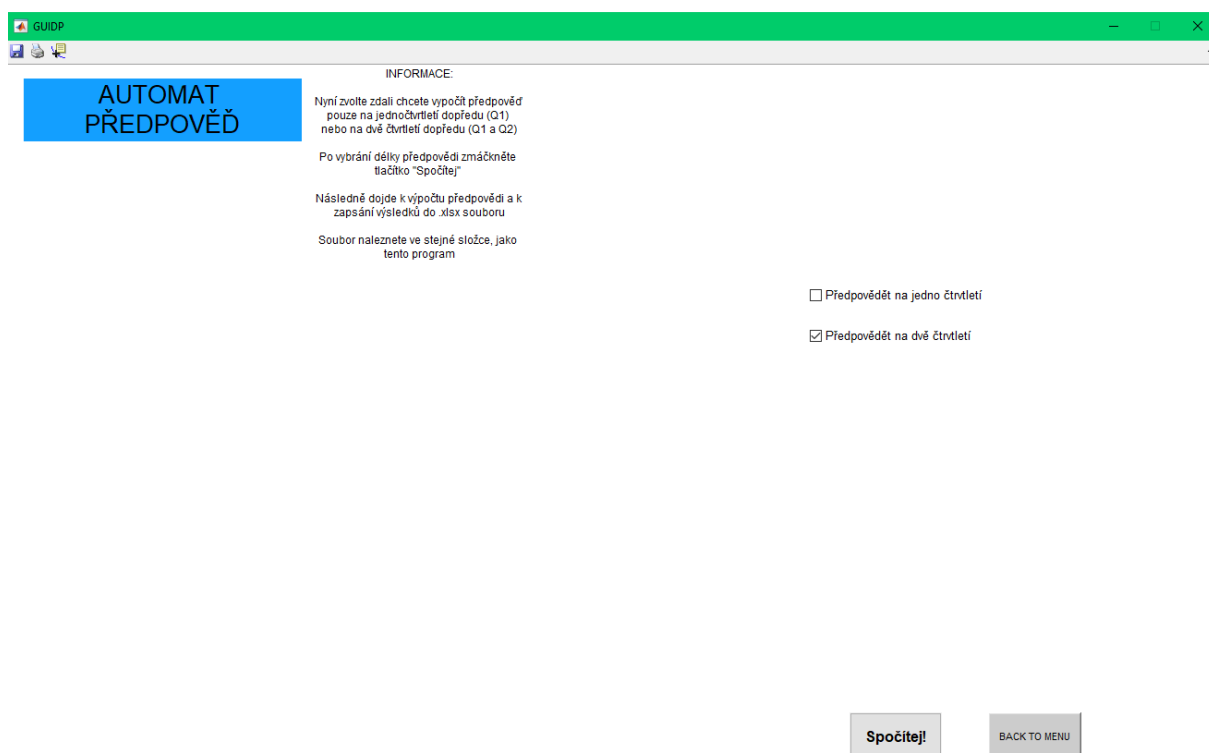
Pro případné reálné použití všech výše zmíněných modelů v praxi, tedy v organizaci oprávněné k údržbě, bylo rozhodnuto, mimo vlastního softwarového nástroje, vytvořit i grafické uživatelské prostředí (*Anglicky: Graphical User Interface – GUI*), které by poskytovalo platformu pro nastavování programu a zobrazování jeho výstupů. Program i GUI bylo vytvořeno v programu MATLAB na míru poskytnuté databázi z CSAT. Pro práci s jiným druhem nebo formátem databáze by bylo nutné kód programu pozměnit, tak aby byla zachována jeho funkčnost. Databáze byla poskytnuta ve formě .xlsx, jde tedy o Excel soubor. Ve zdrojovém kódu programu je přednastaveno, z jakého souboru (databáze) je nutné do programu načíst veškerá potřebná data. V GUI tímto krokem odpadá jakákoli potřeba ručního volení vstupních souborů, jelikož se vše děje plně automaticky.

Při spuštění programu se GUI spustí na úvodní stránce, označené jako „HLAVNÍ MENU“, které vidíme na Obrázku 16. V tuto chvíli má uživatel dvě možnosti, jakými chce dále pracovat s daty.



Obrázek 16 - GUI – stránka „HLAVNÍ MENU“

K dispozici mu jsou dvě tlačítka a informace, které zjednodušeně popisují, co program po stisknutí jednoho nebo druhého tlačítka provede. První tlačítko s názvem „Automatické vypočtení pro všechna P/N“ (na obrázku vlevo), slouží k rychlému výpočtu poptávky pro další časové intervaly bez další nutnosti nastavování programu nebo modelů samotných. Po stisknutí tohoto tlačítka je uživateli zobrazeno okno s názvem „AUTOMAT PŘEDPOVĚĎ“ (Obrázek 17). Jediný parametr, který je potřeba uživatelem nastavit, je právě časový interval, pro který chceme předpověď provést. Jedná se o dvě zaškrťovací pole, kdy první z nich „Předpověď na jedno čtvrtletí“ provede výpočet pro Q1/2021. Jestliže bude zakliknuto druhé pole „Předpověď na dvě čtvrtletí“ program provede výpočet předpovědi poptávky na Q1/2021 a Q2/2021.



Obrázek 17 – GUI – stránka „AUTOMAT PŘEDPOVĚĎ“

Dále jsou uživateli k dispozici opět základní informace o tom, co se stane v případě stisknutí tlačítka „Spočítej!“. Po stisknutí tohoto tlačítka již vše probíhá automaticky. Program načte databázi s historicky reálně naměřenou poptávkou po všech P/N materiálu/dílu v této databázi. Postupně na každé P/N aplikuje každý z 10 variant modelů, kde u každého vypočítá průměrnou absolutní odchylku (*Anglicky: Mean Absolute Deviation – MAD*), která je popsána v kapitole 5. Hodnoty MAD postupně

zapiše do matice. Tuto matici označme *A*, jejíž výřez pro prvních 10 P/N vidíme v Tabulce 8. Hodnotu MAD pro P/N 1 prvního predikčního modelu (EM) vepíše do matice na pozici A(1,1). V druhém kroku vypočítá MAD pro P/N 2, které zapiše na pozici A(2,1). Tímto způsobem vznikne v matici *A* celkově 34 840 řádků a 10 sloupců.

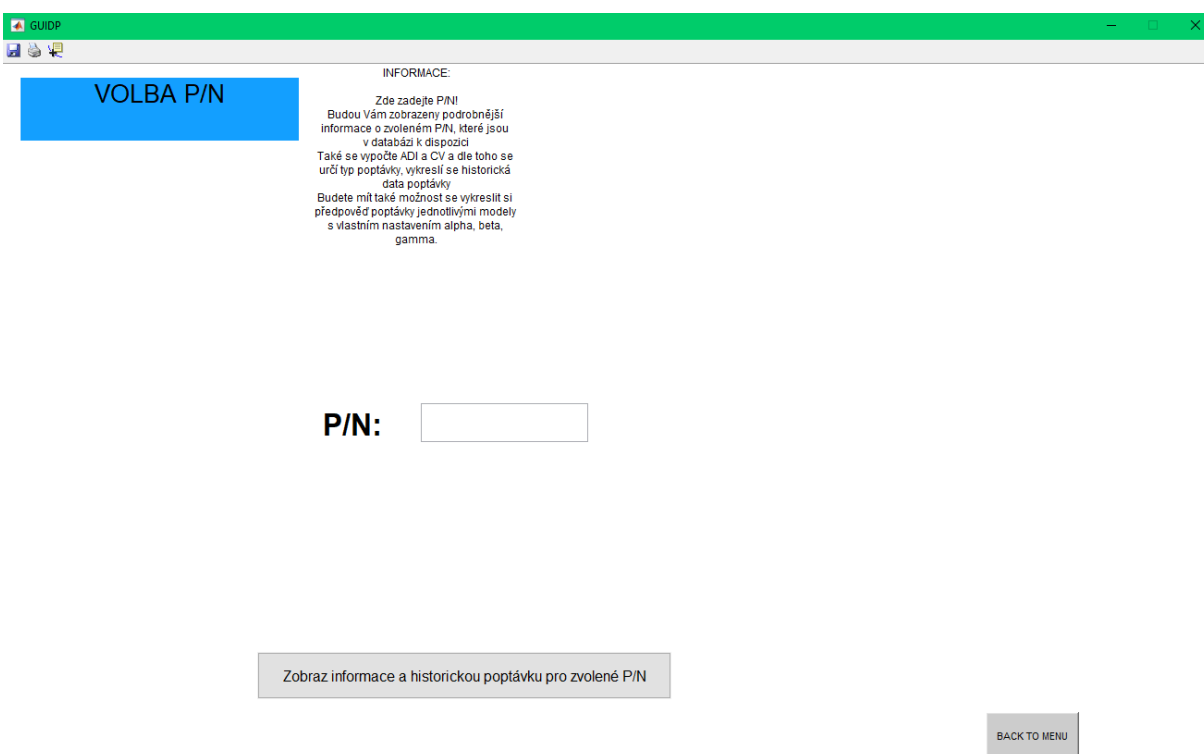
	Výřez matice <i>A</i> obsahující hodnoty <i>MAD</i> predikčních modelů vůči P/N									
	EM	ESMA	ES	BDES	HDES	HWES	CROS.	SBA	TSB	GM
P/N 1	0.7375	0.7550	0.7586	0.8028	0.7624	0.7324	0.6968	0.7233	0.7514	0.6371
P/N 2	0.4250	0.4150	0.4181	0.4570	0.4559	0.5338	0.4765	0.4609	0.4058	0.4423
P/N 3	0.4750	0.5025	0.4954	0.6085	0.5710	0.5810	0.4535	0.4336	0.4272	0.4475
P/N 4	0.1000	0.1000	0.0986	0.1165	0.1234	0.2587	0.0802	0.0768	0.0695	0.0963
P/N 5	8.8375	8.8425	6.7751	8.8972	7.6346	7.9753	8.3452	6.7896	7.3124	7.3533
P/N 6	0.1000	0.1000	0.1000	0.1215	0.1379	0.1664	0.3577	0.2632	0.0772	0.0921
P/N 7	5.3750	5.4375	5.0710	5.5962	5.5500	5.5381	5.0940	5.1482	5.0760	4.3169
P/N 8	0.1500	0.1550	0.1640	0.2120	0.1967	0.3367	0.1121	0.1151	0.1256	0.5019
P/N 9	0.4000	0.4100	0.4085	0.4829	0.4577	0.5626	0.3972	0.3827	0.3631	0.4210
P/N 10	0.7250	0.5800	0.6318	0.7991	0.7827	0.9065	0.6877	0.6950	0.6265	0.8112

Tabulka 8 - Výřez matice *A* pro P/N 1 až P/N 10

Program u každého P/N určí nejnížší MAD, ta je v tabulce vyznačena kurzívou. Díky této nejnížší hodnotě zjistí, který předpovědní model tuto MAD generoval, a právě tento model je posléze využit pro výpočet předpovědi poptávky v čase $t+1$, případně i $t+2$. Zde by již nebylo reálné přehledně zobrazovat výsledky v GUI, jelikož se může jednat o stovky nebo i tisíce předpovědí. Program na konci této operace výsledky zaokrouhlí na celá čísla a vloží je do .xlsx souboru a tento soubor uloží. Jedná se o automatický výpočet předpovědí pro Q1/2021 a Q2/2021. Pokud bychom zvolili předpověď pouze na jedno čtvrtletí, do Excelu se vepíšou pouze předpovědi pro Q1/2021. Uživateli je poté v GUI zobrazeno pouze informativní okno s informací, že operace byla úspěšně dokončena a výsledky byly uloženy do sešitu Excel. Tlačítko „BACK TO MENU“ se objevuje na každé obrazovce GUI mimo té úvodní a slouží právě do navrácení uživatele do hlavního MENU.

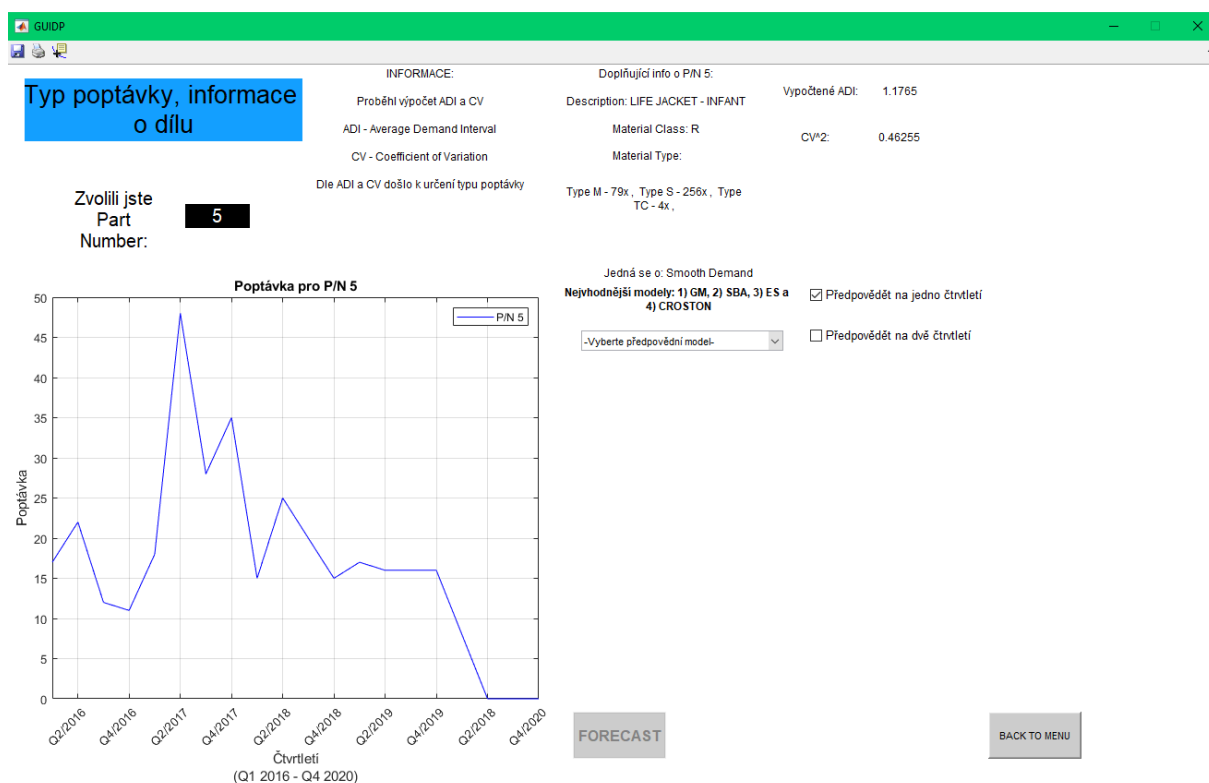
V případě využití této možnosti obdrží uživatel velmi rychle výsledky pro veškerá P/N, která se v databázi nachází, nicméně, jak již bylo naznačeno, nemá možnost úprav jednotlivých smoothing konstant, které mohou mít vliv na celkovou přesnost předpovědi. V tomto případě jsou totiž hodnoty smoothing konstant v kódu programu trvale nastaveny pro veškeré výpočty. Jde tedy o kompromis mezi rychlostí předpovědi a její přesností. Nicméně, jak je uvedeno v kapitole 7, i tento přístup přináší, co se týče přesnosti, validovatelné výsledky.

Pokud chce uživatel měnit při předpovědi poptávky jednotlivé smoothing konstanty anebo také zjistit podrobnější informace o jednotlivých dílech nebo materiálech, na stránce „HLAVNÍ MENU“ musí zvolit druhé tlačítko, kterým je „Informace a předpověď dle P/N“. Po stisku tohoto tlačítka je uživatel skrze okno „VOLBA P/N“, vyzván zadat přesné P/N materiálu/dílu, jemuž se chce dále věnovat. Tato možnost je zobrazena na Obrázku 18.



Obrázek 18 - GUI – stránka „VOLBA P/N“

Po zadání přesného P/N, tedy čísla dílu, program načte specifické informace o daném díle a zobrazí je. To, jaké informace se zobrazí, je neměnně nastavené, nicméně v budoucnu je možné program upravit pro individuální potřeby společnosti. Pokud tedy do pole pro P/N vepíšeme například číslo „5“, a stiskneme tlačítko „Zobraz informace a historickou poptávku pro zvolené P/N“, z databáze budou informace zobrazeny do GUI na stránku „Typ poptávky, informace o dílu“ (Obrázek 19) stejně tak, jako historická reálná poptávka mezi Q1/2016 a Q4/2020 (včetně), která je vykreslena do grafu.



Obrázek 19 - GUI – stránka „Typ poptávky, informace o dílu“, P/N 5

Program uživateli v této chvíli zobrazuje, které P/N si zvolil a jeho historickou poptávku. Dále jsou uživateli zobrazeny informace přímo z databáze. Tyto informace shrnuje Tabulka 9.

Položky z databáze	Popis
Description	Blíže specifikuje daný díl
Material Class	Udává, zdali je díl Rotable Part (R), Consumable (C) nebo Expendable (E)
Material Type	Udává počet, kolikrát byl díl na letadle vyměněn v rámci pravidelné údržby (S), v rámci nepravidelné údržby (M) nebo v rámci TC (TC).

Tabulka 9 - Doplnující informace z databáze zobrazené v GUI

Program dále spočítá koeficient *CV* a také hodnotu *ADI*, jenž jsou potřeba pro určení typu poptávky. Typ dané poptávky je v tomto kroku uživateli také zobrazen. Ke každému druhu poptávky, jsou vypsány ty předpovědní modely, které pro daný typ poptávky vykazovali při vytváření tohoto programu nejmenší chybovost. Jde tedy o čistě empirické výsledky, které mohou být ovlivněny samotnými hodnotami poptávek jednotlivých P/N. Tyto závěry shrnuje Tabulka 10. Program tímto informuje uživatele, který model zvolit pro daný typ poptávky, aby výsledky předpovědi byly co možná nejpřesnější. V tento okamžik je tlačítko „FORECAST“ zablokované a nelze jej selektovat do doby, dokud není vybrán některý předpovědní model.

Typ poptávky	Smooth Demand	Lumpy Demand	Intermittent Demand	Erratic Demand
Navrhované modely	ES	CROSTON	CROSTON	ES
	CROSTON	ESMA	GM	GM
	GM	GM	HDES	HDES
	SBA	HWES	TSB	TSB

Tabulka 10 - Navrhované modely k různým typům poptávky

Dále je uživateli zobrazeno pole, ve kterém má vybrat jeden předpovědní model, podle kterého se vypočte buď předpověď poptávky pro jedno, nebo dvě čtvrtletí, a to stejným způsobem, jako tomu bylo v automatické části programu, tedy pomocí dvou zaškrtačacích polí. Pokud ve výběru, jehož detail je na Obrázku 20, navolíme některý model, kde jsou potřeba smoothing konstanty, v GUI se nám odkryjí upravitelná pole, kam lze hodnoty pro *alpha*, *beta* a případně *gamma* vepsat.

Jedná se o: Smooth Demand

Nejvhodnější modely: 1) GM, 2) SBA, 3) ES a 4) CROSTON

Předpovědět na jedno čtvrtletí

Předpovědět na dvě čtvrtletí

-Vyberte předpovědní model-

- Vyberte předpovědní model-
- MA
- ESMA
- ES
- BDES
- HDES
- HWES
- CROSTON
- SBA**
- TSB
- GM

Obrázek 20 - Detail pro výběr typu modelu

Ke každé konstantě je také přidán krátký popis specifikující blíže danou konstantu. Jakmile model nevyžaduje jednu nebo více těchto konstant, pole jsou zablokováná a nelze je editovat. Tuto možnost lze vidět na detailu, který je na Obrázku 21. Program automaticky hlídá, aby se do těchto polí vepisovaly pouze hodnoty, které jsou pro dané konstanty platné, což je popsáno ve čtvrté kapitole této diplomové práce. Jestliže nejsou pole vyplněna správně, objeví se chybová hláška a pole je nutné upravit.

Jedná se o: Smooth Demand

Nejvhodnější modely: 1) GM, 2) SBA, 3) ES a 4) CROSTON

Předpovědět na jedno čtvrtletí

Předpovědět na dvě čtvrtletí

SBA

alpha

beta

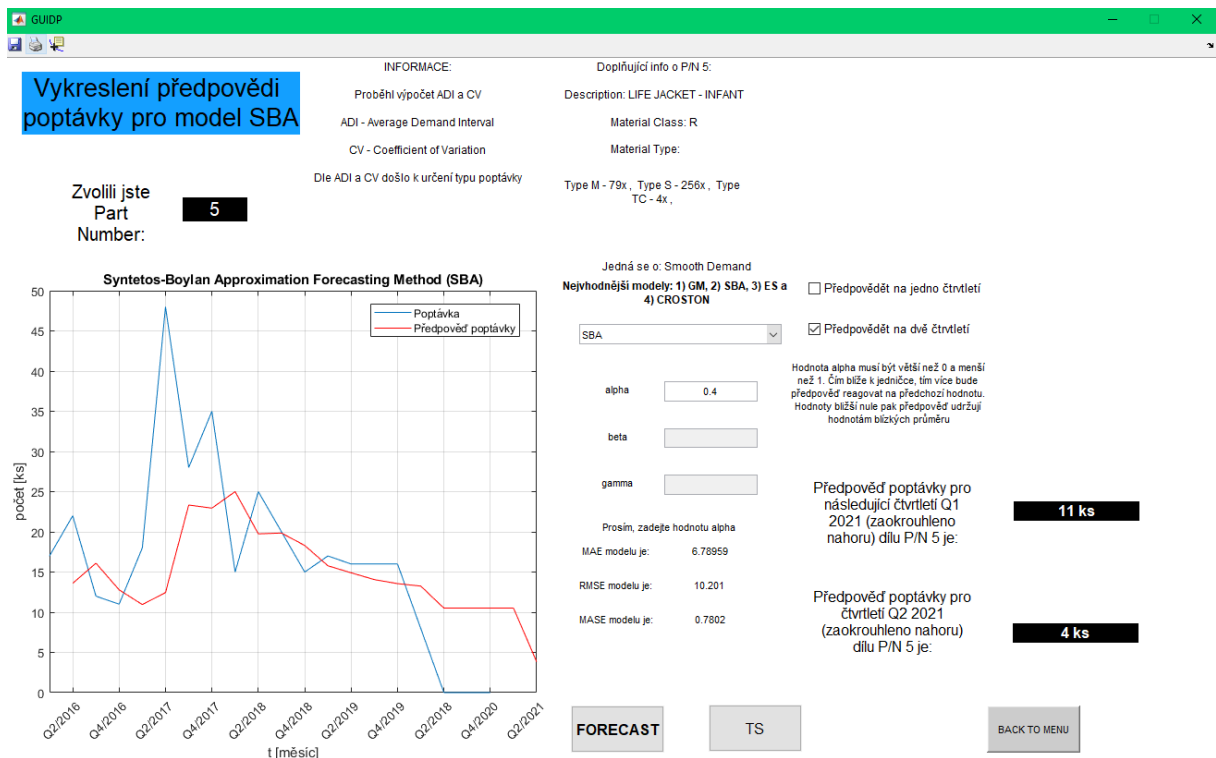
gamma

Hodnota alpha musí být větší než 0 a menší než 1. Čím blíže k jedničce, tím více bude předpověď reagovat na předchozí hodnotu. Hodnoty blíže k nule pak předpověď udržují hodnotám blízkých průměru

Prosím, zadejte hodnotu alpha

Obrázek 21 - Detail pro nastavení smoothing konstant

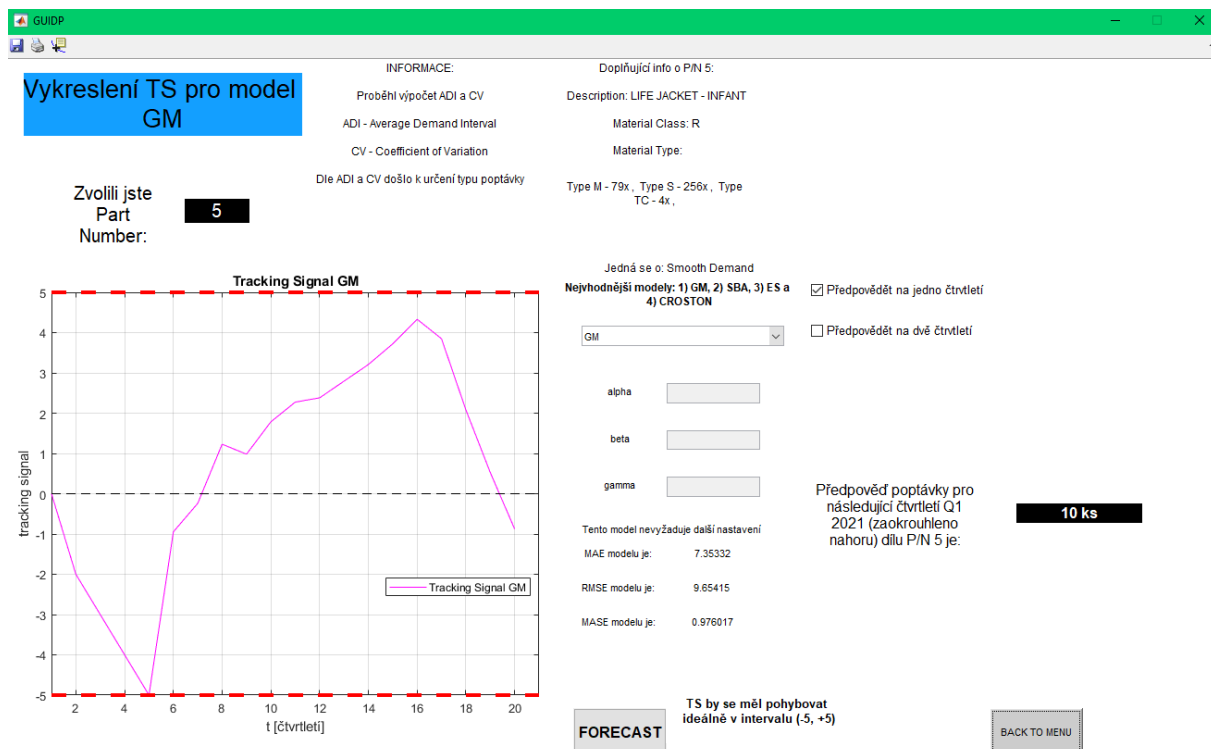
V tuto chvíli je již tlačítko „FORECAST“ aktivní a uživatel tak může přejít na grafické zobrazení předpovědi. Na dalším obrázku bude vykreslena předpověď pro P/N 5 na čtvrtletí Q1/2021 a Q2/2021 podle modelu SBA, který bude pracovat s hodnotou $\alpha = 0.4$. Změna v zobrazování GUI je na Obrázku 22.



Obrázek 22 - GUI – stránka s vykreslením předpovědi – příklad

V GUI se uživateli zobrazí stránka „Vykreslení předpovědi poptávky pro model SBA“, tedy pro model, který byl zvolen. Informace v horní části zůstávají stejné, jen se již nezobrazují hodnoty *CV* a *ADI*. Do grafu se vykreslí předpověď modelu, a to opět zpravidla červenou barvou, zatímco modře zůstává vykreslení skutečné poptávky. Uživateli se taktéž zobrazí jednotlivé chyby modelu *MAE*, *RMSE* a *MASE*. Co je pro uživatele nejdůležitější, jsou dvě černě podbarvená pole v pravé části GUI. Horní z nich obsahuje zaokrouhlenou hodnotu předpovědi pro první čtvrtletí roku 2021 a druhé pole pak analogicky zaokrouhlenou hodnotu předpovědi pro druhé čtvrtletí téhož roku. Poslední změnou je zobrazení tlačítka „TS“, díky kterému si uživatel může nechat vykreslit Tracking Signal (TS). GUI po stisknutí tlačítka „TS“ zobrazí stránku, která je zobrazena na Obrázku 23. Dle hodnot chyb modelu a dle grafu TS je často potřebné upravit smoothing konstanty nebo zvolit jiný model a porovnat jejich přesnosti manuálně. Opět z empirické zkušenosti velmi závisí nejen na druhu poptávky, ale přímo na samotných hodnotách. Z hlediska přesnosti je tedy tato metoda lepší, vyžaduje však výrazně vyšší čas potřebný k finálnímu nastavení modelu.

Tato metoda tedy není vhodná v případech, kdy chtějí zaměstnanci v co nejkratším čase zjistit předpovědi poptávky pro velké množství rozdílných dílů. Naopak, pokud by to situace vyžadovala, pracovník si může vytvořit pro určité P/N přesnější předpověď na budoucí časový interval.



Obrázek 23 - GUI – stránka s vykreslením TS

Na této stránce se pouze změní název stránky a do grafu se vykreslí TS pro zvolený předpovědní model. V grafu lze vidět i červeně znázorněné hranice ± 5 , které byly zvoleny pro použití v této diplomové práci.

7 Validace přesnosti predikcí

Součástí celkového vyhodnocení správnosti, respektive přesnosti výsledků jednotlivých modelů, byla i validace těchto výsledků. K validaci automatických výsledků slouží relativní chyba *SMAPE*. V této fázi bylo navíc nutné upravit některé hodnoty poptávky tak, aby se nerovnaly 0. Aby bylo možné výpočet *SMAPE* aplikovat na všechna P/N poskytnutá organizací CSAT bylo nutné, jen a pouze pro výpočet *SMAPE*, veškeré hodnoty poptávky $x = 0$ změnit na $x = 0.0001$. Tato substituce je nutná, podíváme-li se na výpočet *SMAPE* v rovnici (11.1). Jedna deseti tisícinu procentuální výsledek této chyby téměř neovlivní a je tedy možné tuto substituci provést. Namísto obvyklých 20 % veškerých dat, probíhalo vyhodnocení na celkově 10 % veškerých dat, a to z důvodu velkých zkreslení predikcí modulů při předpovědi celkově čtyř čtvrtletí. Tyto výsledky by tedy byly zkreslené a vykazovaly by značné nepřesnosti. Pro každé P/N tedy proběhla validace na datech za dvě čtvrtletí (Q3/2020 a Q4/2020) a to vždy jen pro předpovědní model, který byl vyhodnocen jako nejpřesnější pro daný díl. Způsob selekce nejpřesnějšího modelu je popsána v kapitole 6. Byly srovnány hodnoty skutečné poptávky x_i za toto období s hodnotami předpovězené poptávky \hat{x}_i právě pro tato dvě období. Zmíněná čtvrtletí byla zvolena proto, že jde o poslední dvě čtvrtletí, kde jsou v databázi reálně naměřená data a také proto, že modely pracují s předpovědí následujících dvou čtvrtletí. Jde tedy o zpětnou analýzu přesnosti modelu. Při vyhodnocování přesnosti pomocí *SMAPE* se však ukázalo, že pokud je tato chyba skutečně počítána s veškerými dostupnými daty, modely vykazují velmi vysoké přesnosti. Je to dáno tím, že část P/N v databázi se na letadla za čtyři roky nainstalovala jen v řádu jednotek kusů. Příklad této poptávky a její předpovědi vidíme v Tabulce 11. Tučně jsou znázorněny čtvrtletí zvolené k validaci. V těchto případech je *SMAPE* rovno 100 [%].

Čtvrtletí	Q1/2016	Q2/2016	...	Q4/2018	Q1/2019	Q2/2019	Q3/2019	Q4/2019	Q1/2020	Q2/2020	Q3/2020	Q4/2020
Skutečná poptávka	0	0	...	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Predikce poptávky	0	0	...	0	0	0.6	0.33	0.17	0.07	0	0	0

Tabulka 11 - Příklad predikce pro *SMAPE* = 100[%] (model BDES pro P/N 4)

Tato data tedy obsahují velké množství nulové poptávky, kterou modely přesně predikují. Bylo proto vhodné část dat z výpočtu *SMAPE* vyřadit, aby bylo možné vyhodnotit přesnost predikce pro více používané díly, a tím ověřit schopnost použití softwarového řešení v reálném prostředí. Z výpočtu nakonec byly nejprve vyřazeny veškeré P/N, jenž se za roky 2016 až 2020 použily méně jak 50x a následně pro stejné období méně jak 100x. Při vyšších hodnotách se již hodnoty *SMAPE* nikterak významně nelišily. Všechny tři sady výsledků *SMAPE* srovnává Tabulka 12.

Předpovědní model	<i>SMAPE</i> (%) (Všechna P/N)	<i>SMAPE</i> (%) (P/N s poptávkou >50ks / 4 roky)	<i>SMAPE</i> (%) (P/N s poptávkou >100ks / 4 roky)
MA	88.1196	86.7445	84.8804
ESMA	95.9666	87.0792	85.6691
ES	90.2614	85.5692	83.0876
BDES	89.8170	80.4919	78.3387
HDES	86.0719	79.4891	76.8160
HWES	94.1304	86.0053	84.9771
CROSTON	97.2057	87.3907	85.6256
SBA	95.3116	87.9249	85.5282
TSB	99.2822	87.4885	84.9741
GM	92.1011	86.2944	83.9450

Tabulka 12 – Výsledky *SMAPE*

8 Vyhodnocení výsledků

Jako cíl této práce byl dán návrh predikce potřebného materiálu pro plánované i neplánované práce v těžké údržbě letadel. Organizací, jež poskytla potřebná data, byla společnost CSAT.

V počátku práce bylo potřeba zvolit způsob, jakým by predikce probíhala. S využitím dat organizace se přistoupilo k použití celkově deseti předpovědních modelů, případně jejich různých variant. Použití více modelů bylo nutné k zachování možnosti přesných předpovědí pro více druhů poptávky, a to z důvodu odlišných přístupů k výpočtu predikcí těchto modelů. Taktéž toto řešení umožnilo vzájemně porovnat přesnosti matematických předpovědních modelů pro relevantní sadu dat organizace CSAT. Tyto modely jsou blíže představeny v kapitole 6 této práce.

Výsledkem diplomové práce je také plně funkční program pracující s predikčními modely, skrze který dochází k vlastní predikci potřebného materiálu. Program nabízí dvě možnosti, jak predikci materiálu provést. První je plně automatická předpověď poptávky pro veškeré díly v databázi, kdy program sám určí nejpřesnější model. Při tomto způsobu predikce uživatel volí pouze to, zdali chce predikci provést na tři nebo šest měsíců dopředu. Výsledky z této predikce jsou ukládány do souboru Excel. Druhou možností je vykreslení predikce potřebného materiálu pro jednotlivá P/N, a to jakýmkoli předpovědním modelem, jež je k dispozici. Zde je také možnost nechat si zobrazit skrze uživatelské prostředí další informace o daném materiálu. Tato druhá možnost pak uživateli umožňuje přesnější predikce díky zobrazení chyb a taktéž umožňuje manuální úpravy modelu, v podobě nastavení vyhlazovacích konstant. Tyto dvě možnosti zaručují širší schopnost uplatnění tohoto programu.

Porovnání způsobu zobrazení výsledků je vidět na Obrázku 24, kde je vlevo ukázka ze sešitu Excel pro automatickou předpověď více P/N a vpravo pak výstup pro predikci poptávky pro jedno P/N, které jsou zobrazeny přímo v GUI. Hodnoty jsou pro oba výstupy zaokrouhleny.

	A	B	C
1	Part Number	Q1 Forecast	Q2 Forecast
2	P/N 1	2	2
3	P/N 2	1	1
4	P/N 3	1	1
5	P/N 4	0	0
6	P/N 5	3	2
7	P/N 6	0	0
8	P/N 7	9	9
9	P/N 8	1	1

Předpověď poptávky pro následující čtvrtletí Q1 2021 (zaokrouhleno nahoru) dílu P/N 5 je:

2 ks

Předpověď poptávky pro čtvrtletí Q2 2021 (zaokrouhleno nahoru) dílu P/N 5 je:

1 ks

Obrázek 24 - Příklady výstupů predikcí z programu MATLAB

Pro správnou funkci programu bylo dále nutné upravit poskytnutou databázi do formátu, který pak bude optimální k jeho správné funkci. S takto upravenou databází je program schopen predikovat potřebný materiál na jedno nebo na nadcházející dvě čtvrtletí. Tato možnost predikce je zachována jak pro plně automatickou část programu, tak i pro část, kdy je možné vykreslovat predikce jednotlivě. Hodnoty predikce jsou uživateli zobrazeny skrze program samotný a v případě většího počtu výsledků jsou výsledky vepsány do sešitu Excel, který je pro velké objemy dat přehlednější.

9 Závěr

Tato diplomová práce navrhuje možnosti, jak predikovat poptávku po dílech potřebných při těžké údržbě letadel a její snahou je také napomoci společnosti CSAT, případně i dalším organizacím oprávněných k údržbě, aby mohly efektivněji předpovídat poptávku po dílech, čímž by došlo ke snížení nákladů společností. Predikce materiálu je již v dnešní době možné provést určitými způsoby, avšak, jak je blíže popsáno v této práci, provozovatelé je využívají jen málo. Plánování potřebného materiálu tak stále probíhá na základě zkušeností zaměstnanců, případně se množství některých dílů držených na skladě odvíjí od předem stanoveného minimálního množství.

Výzkum, obsažený v této diplomové práci, byl založen na reálných datech z provozu organizace oprávněné k údržbě letadel, a tedy výsledky mají vypovídající hodnotu a byly validovány na nezávislém datovém setu. Do této diplomové práce bylo jako možné řešení efektivní předpovědi materiálu a dílů, zvoleno využití matematických modelů, které tvoří základy vytvořeného programu v prostředí MATLAB. Tento program obsahuje i uživatelské prostředí, skrze které je možné program uživatelem přehledně ovládat. Celkově byly zvoleny dvě možnosti, jakými je možné nechat předpovědět poptávku po daných dílech. Predikční modely jsou schopny předpovídat na jedno nebo na dvě čtvrtletí dopředu, což bylo vyhodnoceno jako kompromis mezi potřebami organizací a přesností modelů, která klesá s rostoucím počtem předpovídaných časových intervalů. Celková přesnost predikcí je určena validací predikčních modelů obsažené v kapitole 7. Cílem této diplomové práce bylo vytvoření návrhu možného způsobu predikce potřebného materiálu pro plánované i neplánované práce v těžké údržbě letadel, kdy byl tento cíl splněn.

Prostor pro další vývoj v oblasti predikce potřebných dílů v těžké údržbě letadel je zajištěn v celkové přesnosti předpovědí. Pro společnosti by bylo ideální, aby se přesnost předpovědi pohybovala na hladině 90 % a to napříč všemi druhy poptávky. Zvýšení přesnosti by mohl přinést výzkum, který by aplikoval princip neuronových sítí. Tento přístup si však žádá mnohem větší vzorek relevantních dat, než jaký byl k dispozici v této diplomové práci. Neuronové sítě poskytují přehled o vývoji poptávky, zvláště pak její sezónnosti, což je v případě nepravidelné poptávky, většinou zastoupené u dílů potřebných pro těžkou údržbu letadel, vhodné. Následující výzkum by se mohl pro další

zvýšení efektivity těžké údržby letadel zaměřit na sledování a predikci dílů vzhledem k jednotlivým pracím údržby na letadle. A to buď v rámci jednotlivých TC nebo v rámci jedné těžké údržby letadla, jakou je například C-Check. Další možností je pak predikovat potřebné díly pro údržbu v závislosti na jednotlivých typech letadel.

Mezi hlavní hrozby, které by mohly ohrozit další výzkum v oblasti predikce potřebného materiálu, je nenadálý nárůst nebo naopak propad v poptávce po dílech. Ten do jisté míry právě probíhá vlivem pandemie Coronaviru. Při aktuální, ale i budoucí predikci dílů, je tak nutné zvážit dopad tohoto propadu na predikovaná data a v případě potřeby období Coronaviru z předpovědi vyřadit. Jistá míra nejasnosti však v plánování materiálu pro těžkou údržbu letadel vždy zůstane v podobě pravděpodobnosti vzniku závady.

V budoucnu můžeme čekat nárůst letecké dopravy, a tedy i větší zatížení údržbových organizací. Taktéž se bude pravděpodobně komplexnost letadel dále zvyšovat, což znamená větší počet dílů, které je nutné pravidelně udržovat. Zvýšení efektivity údržby díky ušetření nákladů organizací oprávněných k údržbě při zachování standardu bezpečnosti je nevyhnutelné, pokud si chtějí tyto organizace zachovat konkurenceschopnost. Použití metod podobných těm, které jsou popsány v této diplomové práci, je tak v budoucnu nezbytné. Pevně doufám, že se výsledky této práce z části promítnou do chodu organizací oprávněných k údržbě, nebo alespoň poskytnou potřebné informace dalším studentům věnujícím se problematice údržby letadel.

Zdroje

Literatura

- [1] *Nařízení Komise (EU) č. 1321/2014: o zachování letové způsobilosti letadel a leteckých výrobků, letadlových částí a zařízení a schvalování organizací a personálu zapojených do těchto úkolů.* 2014.
- [2] KINNISON, PH.D., Harry A. *Aviation Maintenance Management.* New York, NY: McGraw-Hill, 2004. ISBN 978-0-07-142251-2.
- [3] SAMARANAYAKE, Premaratne a Senevi KIRIDENA. Aircraft maintenance planning and scheduling: an integrated framework. *Journal of Quality in Maintenance Engineering.* 2012, 18(4), 432-453. ISSN 1355-2511. Dostupné z: doi:10.1108/13552511211281598
- [4] PALMER, Richard D. *Maintenance Planning and Scheduling Handbook.* Second Edition. McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-145766-6.
- [5] HUISKONEN, Janne. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. *International Journal of Production Economics.* 2001, 71(1-3), 125-133. ISSN 09255273. Dostupné z: doi:10.1016/S0925-5273(00)00112-2
- [6] *Labor Rate and Productivity Calculations For Commercial Aircraft Maintenance.* Montreal - Geneva: International Air Transport Association, 2013. ISBN 978-92-9252-030-4.
- [7] BING, Chen, Sun SHOUQUN a Liu GANG. An Optimized Unbiased GM (1, 1) Power Model for Forecasting MRO Spare Parts Inventory. *Modern Applied Science.* 2012, 6(6). ISSN 1913-1852. Dostupné z: doi:10.5539/mas.v6n6p12
- [8] GHOBBAR, Adel A. a Chris H. FRIEND. *Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model.* 2003, 30(14), 2097-2114. ISSN 03050548. Dostupné z: doi:10.1016/S0305-0548(02)00125-9
- [9] ZORGDRAGER, M., R. CURRAN a W.J.C VERHAGEN. *A Predictive Method For the Estimation of Material Demand for Aircraft Non-Routine Maintenance.* 2013, 507-516. Dostupné z: doi:10.3233/978-1-61499-302-5-507
- [10] DZIKEVIČIUS, Audrius a Svetlana ŠARANDA. EMA versus SMA Usage to Forecast Stock Markets: The Case of S#38;P 500 and OMX Baltic Benchmark. *Verslas: teorija ir praktika* [online]. 2010, 11(3), 248-255 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1648-0627. Dostupné z: doi:10.3846/btp.2010.27

- [11] HANSUN, Seng. A New Approach of Brown's Double Exponential Smoothing Method in Time Series Analysis. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. 2016, 4(2) [cit. 2021-5-3]. ISSN 2147-284X. Dostupné z: doi:10.17694/bajece.14351
- [12] HYNDMAN, Rob J. a George ATHANASOPOULOS. *Forecasting: Principles and Practice*. 2nd Edition. OTexts, 2018. ISBN 0987507117.
- [13] BABAI, M.Z., Y. DALLERY, S. BOUBAKER a R. KALAI. A new method to forecast intermittent demand in the presence of inventory obsolescence. *International Journal of Production Economics* [online]. 2019, 209, 30-41 [cit. 2021-5-3]. ISSN 09255273. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpe.2018.01.026
- [14] MAO, Shuhua, Mingyun GAO, Xiping XIAO a Min ZHU. A novel fractional grey system model and its application. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2016, 40(7-8), 5063-5076 [cit. 2021-5-3]. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apm.2015.12.014
- [15] HAVLÍK, Jindřich. *Hodnocení kvality odhadu stavu stochastických systémů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky. Vedoucí práce Ing. Ondřej Straka, Ph.D

Internetové zdroje:

- [16] European Union Aviation Safety Agency. *EASA* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency>
- [17] Federal Aviation Administration. *FAA* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/about/>
- [18] VANDEPUT, Nicolas. Forecasting Intermittent Demand with the Croston Model. *Towards Data Science* [online]. 25.01.2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/croston-forecast-model-for-intermittent-demand-360287a17f5f>
- [19] HYNDMAN, Rob J. Another Look at Forecast: Accuracy Metrics for Intermittent Demand. *Foresight* [online]. June 2006, (4), 43-46 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://robjhyndman.com/papers/foresight.pdf>
- [20] HEDIN, Tyler a Tom FOSTER, DR. *Tracking Signal: A Measure of Forecast Accuracy* [prezentace online]. 2006 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20110726064747/http://www.freequality.org/documents/Training/Tracking%20Signal%20in%20Forecasting.ppt>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma číslování ATA [2].....	19
Obrázek 2 - Příklady druhů poptávek, vlastní tvorba	45
Obrázek 3 – Příklad druhů poptávek pro vybraná P/N z databáze.....	47
Obrázek 4 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu MA.....	51
Obrázek 5 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu ESMA.....	52
Obrázek 6 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu ES	53
Obrázek 7 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu BDES	55
Obrázek 8 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu HDES	56
Obrázek 9 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu HWES	58
Obrázek 10 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu CROSTON.....	59
<i>Obrázek 11 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu SBA.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 12 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu TSB</i>	<i>63</i>
Obrázek 13 - P/N 5 - předpověď pomocí modelu GM(1,1).....	65
Obrázek 14 - Vykreslení TS pro vhodně nastavený model (P/N 5).....	70
Obrázek 15 - Vykreslení TS pro nevhodně nastavený model (P/N 5).....	71
Obrázek 16 - GUI – stránka „HLAVNÍ MENU“	72
Obrázek 17 – GUI – stránka „AUTOMAT PŘEDPOVĚĎ“	73
Obrázek 18 - GUI – stránka „VOLBA P/N“.....	75
Obrázek 19 - GUI – stránka „Typ poptávky, informace o dílu“, P/N 5	76
Obrázek 20 - Detail pro výběr typu modelu	78
Obrázek 21 - Detail pro nastavení smoothing konstant	78
Obrázek 22 - GUI – stránka s vykreslením předpovědi – příklad	79
Obrázek 23 - GUI – stránka s vykreslením TS.....	80
Obrázek 24 - Příklady výstupů predikcí z programu MATLAB	84

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Ukázka dat poskytnutých z CSAT	40
Tabulka 2 - Souhrn počtu dílů a typů materiálů v databázi	41
Tabulka 3 - Ukázka ze součtu dat poptávky pro jednotlivá čtvrtletí.....	42
Tabulka 4 - Označení období v čase pro jednotlivá čtvrtletí.....	43
Tabulka 5 - Druhy poptávky [8].....	44
Tabulka 6 - Rozdělení dílů z databáze dle druhů poptávek.....	46

Tabulka 7 - Skutečná poptávka P/N 5	50
Tabulka 8 - Výřez matice A pro P/N 1 až P/N 10.....	74
Tabulka 9 - Doplnující informace z databáze zobrazené v GUI.....	77
Tabulka 10 - Navrhované modely k různým typům poptávky	77
Tabulka 11 - Příklad predikce pro SMAPE = 100[%] (model BDES pro P/N 4).....	81
Tabulka 12 – Výsledky SMAPE.....	82

Příloha 1

Skript modelů pro predikci poptávky

```
xxxx=data2(PN,:); %načtení dat z databáze
x = xxxx(~isnan(xxxx)); %odmázání NaN
n=length(x);
t=n;

% Model MA
for t=4:n
    xf1(t+1)=(x(t)+x(t-1)+x(t-2)+x(t-3))/4;
    xf=xf1; %predikce pro t+1
end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    xf2(n+2)=(xf(n+1)+x(n)+x(n-1)+x(n-2))/4;
    xf(1,n+2)=xf2(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model ESMA
for t=4:n

    MA1(t+1)=(x(t)+x(t-1)+x(t-2)+x(t-3))/4;
    xf1(t+1)=((alpha*x(t))+((1-alpha)*MA1(t)));
    xf=xf1; %predikce pro t+1
end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    MA2(n+2)=(xf(n+1)+x(n)+x(n-1)+x(n-2))/4;
    xf2(n+2)=((alpha*xf(n+1))+((1-alpha)*MA2(n+1)));
    xf(1,n+2)=xf2(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model ES
for t=1:nd
    xf1(t+1)=((1-alpha))*xf1(t)+(alpha*x(t));
    xf=xf1; %predikce pro t+1
end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    xf2(n+2)=((1-alpha))*xf1(n+1)+(alpha*x(n));
    xf(1,n+2)=xf2(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model BDES
for t=2:nd
    xf1(t)=((1-alpha))*xf1(t-1)+(alpha*x(t));
    xf2(t)=((1-alpha))*xf2(t-1)+(alpha*xf1(t));
    xa(t)=(2*xf1(t))-xf2(t);
    xb(t)=(alpha/(1-alpha))*(xf1(t)-xf2(t));
    xf(t+1)=xa(t)+(xb(t)); %predikce pro t+1
```

```

end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    xf11(n+1)=(1-alpha)*xf1(n)+(alpha*x(n));
    xf22(n+1)=(1-alpha)*xf2(n)+(alpha*xf(n+1));
    xaa(n+1)=(2*xf11(n+1))-xf22(n+1);
    xbb(n+1)=(alpha/(1-alpha))*(xf11(n+1)-xf22(n+1));
    xf2(n+2)=xaa(n+1)+xbb(n+1);
    xf(1,n+2)=xf2(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model HDES
for t=2:nd
    xf1(t)=(alpha*x(t))+((1-alpha)*(xf1(t-1)+xf2(t-1)));
    xf2(t)=(beta*(xf1(t)-xf1(t-1)))+((1-beta)*xf2(t-1));
    xf(t+1)=xf1(t)+xf2(t); %predikce pro t+1
end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    xf11(n+1)=(alpha*xf(t+1))+((1-alpha)*(xf1(n)+xf2(n)));
    xf22(n+1)=(beta*(xf11(n+1)-xf1(n)))+((1-beta)*xf2(n));
    xf2(n+2)=xf11(n+1)+xf22(n+1);
    xf(1,n+2)=xf2(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model HWES
for t=5:nd
    xf1(t)=(alpha*(x(t)-sf(t-L)))+((1-alpha)*(xf1(t-1)+ptf(t-1)));
    ptf(t)=(beta*(xf1(t)-xf1(t-1)))+((1-beta)*ptf(t-1));
    sf(t)=(delta*(x(t)+xf1(t)))+((1-delta)*sf(t-1));
    xf2(t+1)=xf1(t)+ptf(t)+sf(t+1-L);
    xf=(xf2); %predikce pro t+1
end

if check_box==2 %predikce pro t+2
    xf11(n+1)=(alpha*(xf(n+1)-sf(n+1-L)))+((1-alpha)*(xf1(n)+ptf(n)));
    ptf(n+1)=(beta*(xf11(n+1)-xf1(n)))+((1-beta)*ptf(n));
    sff(n+1)=(delta*(xf(n+1)+xf11(n+1)))+((1-delta)*sf(n));
    xf22(n+2)=xf11(n+1)+ptff(n+1)+sff(n+2-L);
    xf(1,n+2)=xf22(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model CROSTON
for t=2:nd
    if x(t)==0 %poptávka v čase t
        xf1(t+1) = xf1(t); %předpověď poptávky pro t+1
        ptf(t+1) = ptf(t); %předpověď intervalu poptávky
        qo=qo+1; %čas od poslední poptávky, která nebyla 0
    else
        xf1(t+1) = xf1(t)+(alpha*(x(t)-xf1(t)));
        ptf(t+1) = ptf(t) + (alpha*(qo-ptf(t)));
        qo=1;
    end
end

```

```

        xf2(t+1)=xf1(t+1)/ptf(t+1);
        xf=(xf2); %predikce pro t+1
    end

    if check_box==2 && xf(n+1)==0
        xf11(n+2)=xf1(n+1);
        ptff(n+2)=ptf(n+1);
        qo=qo+1;
        xf(n+2)=xf11(n+2)/ptff(n+2);
    elseif check_box==2 %predikce pro t+2
        xf11(n+2)= xf1(n+1)+(alpha*(xf(n+1)-xf(n+1)));
        ptff(n+2)= ptf(n+1)+(alpha*(qo-ptf(n+1)));
        qo=1;
        xf(n+2)=xf11(n+2)/ptff(n+2);
    elseif check_box==1
        xf=xf;
    end

% Model SBA
for t=1:nd
    if x(t)==0;
        xf1(t+1) = xf1(t);
        ptf(t+1) = ptf(t);
        q0=q0+1;
    else
        xf1(t+1) = xf1(t)+(alpha*(x(t)-xf1(t)));
        ptf(t+1) = ptf(t) + alpha*(q0-ptf(t));
        q0=1;
    end
    xf2(t+1)=(1-(alpha/2))*(xf1(t+1)/ptf(t+1));
    xf=(xf2); %predikce pro t+1
end

if check_box==1
    xf=xf;
else %predikce pro t+2
    if xf(n+1)==0
        xf11(n+2)=xf1(n+1);
        ptff(n+2)=ptf(n+1);
        q0=q0+1;
        xf(n+2)=(1-(alpha/2))*(xf11(n+2)/ptff(n+2));
    else
        xf11(n+2)=(alpha*xf(n+1))+((1-alpha)*xf(n+1));
        ptff(n+2)=(alpha*q0)+((1-alpha)*(ptf(n+1)));
        qo=1;
        xf(n+2)=(1-(alpha/2))*(xf11(n+2)/ptff(n+2));
    end
end

% Model TSB
for t=1:nd
    if x(t)==0;
        xf1(t+1) = xf1(t);
        ptf(t+1) = (1-beta)*ptf(t);
        xf2(t+1)=xf1(t+1)*ptf(t+1);
    else
        xf1(t+1) = (alpha*x(t))+((1-alpha)*xf1(t));
        ptf(t+1) = beta + ((1-beta)*ptf(t));
        xf2(t+1)=xf1(t+1)*ptf(t+1);
    end
end

```

```

end
xf=(xf2); %predikce pro t+1
end

if xf(n+1)==0 && check_box==2 %predikce pro t+2
    xf11(n+2)=xf1(n+1);
    ptff(n+2)=(1-beta)*(ptf(n+1));
    xf(n+2)=xf11(n+2)*ptff(n+2);
elseif check_box==2 && xf(n+1)>0
    xf11(n+2)=(alpha*xf(n+1))+((1-alpha)*xf(n+1));
    ptff(n+2)=(beta)+((1-beta)*ptf(n+1));
    xf(n+2)=xf11(n+2)*ptff(n+2);
elseif check_box==1
    xf=xf;
end

% Model GM
if check_box==1
    x1=cumsum(x);
    x1=x1';

    BA=ones(n-1,2);
    for i=1:(n-1)
        B(i,1)=-0.5*((x1(i)+x1(i+1)));
        B(i,2)=1;
    end
    BT=B';
    for j=2:n
        YN(j-1)=x(j);
    end
    YN=YN';
    AO=inv(BT*B)*BT*YN;
    a=AO(1);
    u=AO(2);

    %predikce 1 časový okamžik vpřed
    v=1:(n+1);
    t=u/a;
    xx1(v+1)=((x(1)-t).*exp(-a*v))+t);
    xx1(1)=x(1); %počáteční podmínka

    for k=2:(n+1)
        xf2(k)=xx1(k)-xx1(k-1);
        xf=(xf2); %predikce pro t+1
    end

elseif check_box==2 %predikce pro t+2
    x1=cumsum(x);
    x1=x1';
    BA=ones(n-1,2);

    for i=1:(n-1)
        B(i,1)=-0.5*((x1(i)+x1(i+1)));
        B(i,2)=1;
    end

    BT=B';

```

```

for j=2:n
    YN(j-1)=x(j);
end
YN=YN';
AO=inv(BT*B)*BT*YN;
a=AO(1);
u=AO(2);

%predikce 1. a 2. časový okamžik vpřed
v=1:(n+2);
t=u/a;
xx1(v+1)=((x(1)-t).*exp(-a*v))+t;
xx1(1)=x(1); %počáteční podmínka

for k=2:(n+2)
    xf2(k)=xx1(k)-xx1(k-1);
    xf=(xf2);
end
end

```