

SW analýza výkonových poměrů v trakční síti 25 kV se souvislým napájením

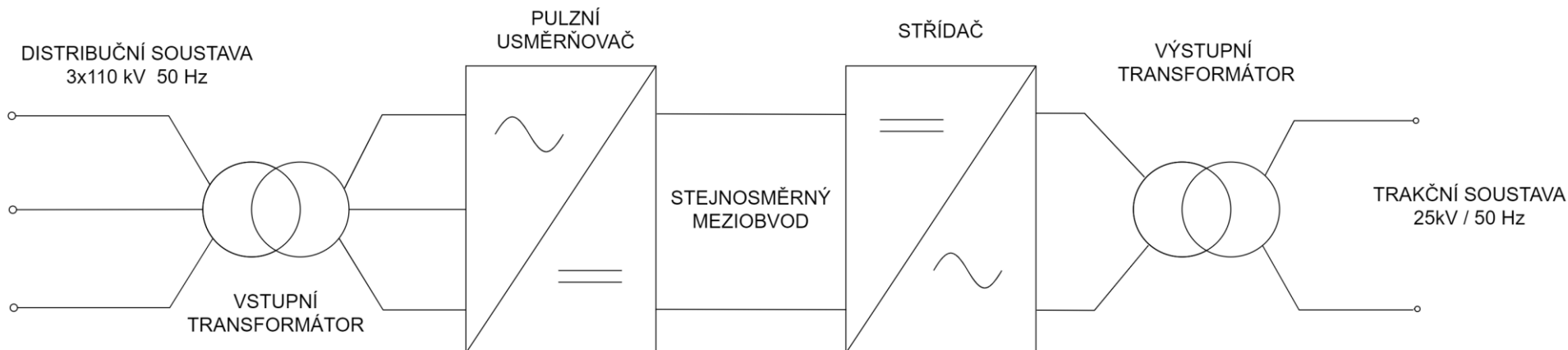
Jaroslav Novák
Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice

Za podpory projektu TAČR THETA 2 TK 02010009 Zvyšování efektivity železniční dopravy v rámci energetické optimalizace systému multimodální mobility

Zaměření aktivit:

Studované okruhy:

- Vlastnosti synchronizovaného řízení měničových napájecích stanic 25 kV, 50 Hz
- Analytické ověřovací výpočty speciálních případů synchronizovaného řízení
- Vymezení výřezu železniční sítě ČR pro vytvoření modelové koncepce elektrizace tratí soustavou 25 kV
- Vývoj SW pro analýzu trakčního napájení v oblasti



Charakteristika vyvíjeného SW:

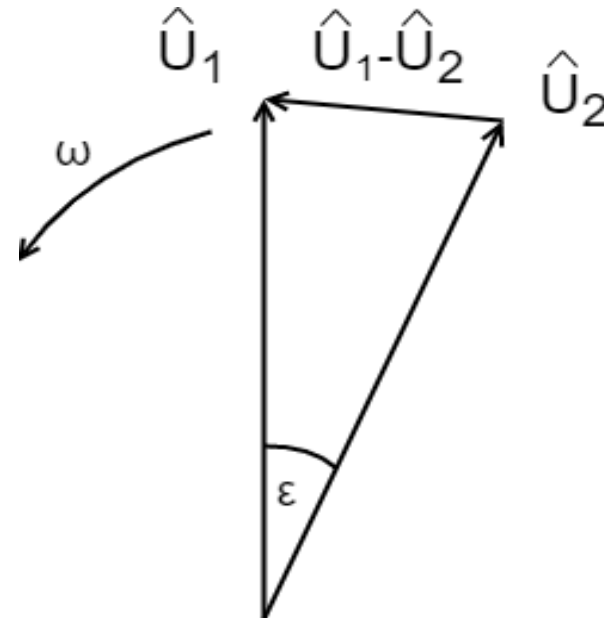
- Zcela variabilní zadání sítě elektrifikovaných tratí
- Zadání časových závislostí rychlostí a příkonů vlaků
- Výpočet výkonů a energií napájecích stanic a vlaků
- Výpočet ztrátových výkonů a účinností přenosů
- Výpočet napětí v uzlových bodech a u vlaků
- Možnost výpočtů při konvenčním způsobu napájení (konvenční napájecí stanice, jednostranné napájení)
- Možnost výpočtů v síti se souvislým napájením
- Výpočty efektů měničového napájení (řízení výkonových a energetických toků, preference rekuperace v rámci trakční sítě)
- Výpočty zkratových poměrů
- Otevřenost pro speciální výpočty (akumulace)

Důraz na výpočty synchronizovaného řízení napájecích stanic:

Synchronizované řízení měničových napájecích stanic:

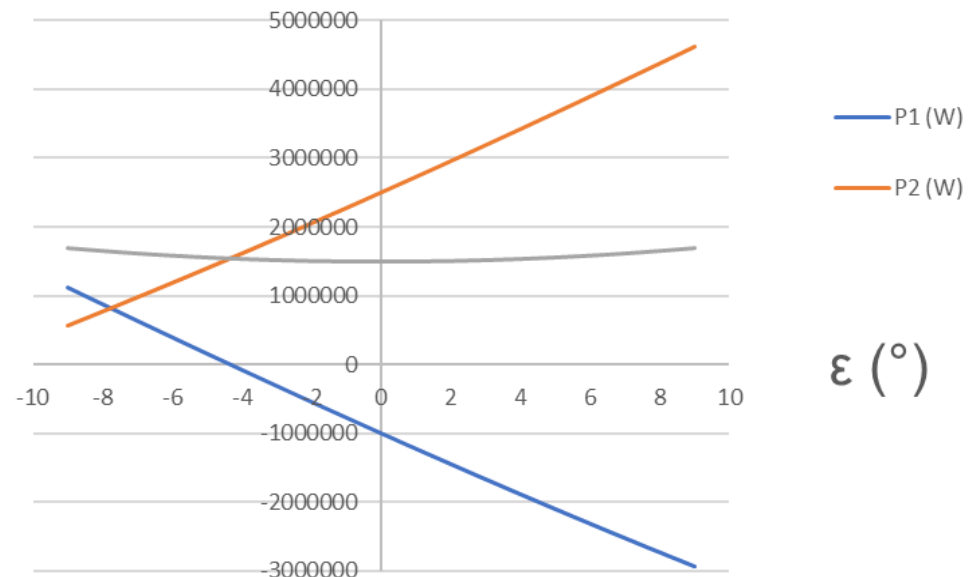
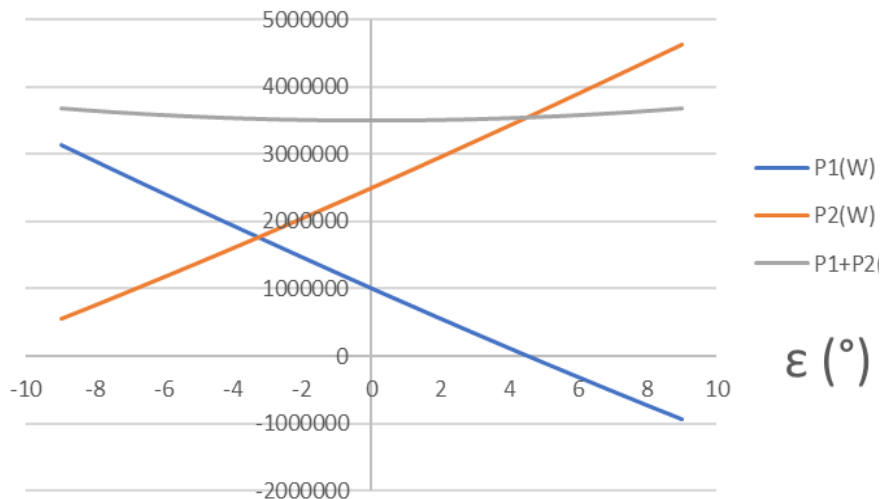
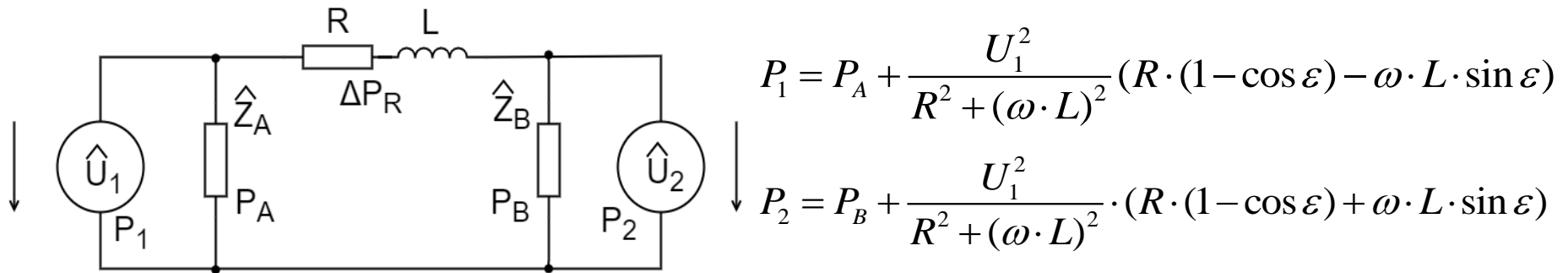
Změnou fázového posunu výstupního napětí měničových napájecích stanic lze řídit velikost dodávaného výkonu

- Zamezení překročení mezních výkonů napájecích stanic
- Maximální využití rekuperace uvnitř trakční sítě
- Zamezení přetoků energie přes trakční síť



Analytické ověřovací výpočty speciálních případů synchronizovaného řízení

Příklad analytického řešení speciálních případů



Prostředí pro implementaci SW

Pro tvorbu SW bylo využito prostředí Matlab a to z následujících důvodů:

- SW je orientovaný na provádění vědeckotechnických výpočtů a pro tyto výpočty je vybaven řadou funkcí
- Jedná se o standardní SW pro vědeckotechnické výpočty
- SW výrazně podporuje využití strukturovaných proměnných a vícerozměrných polí
- SW podporuje výpočty s komplexními čísly
- SW má knihovní podporu pro řešení soustav rovnic s komplexními čísly

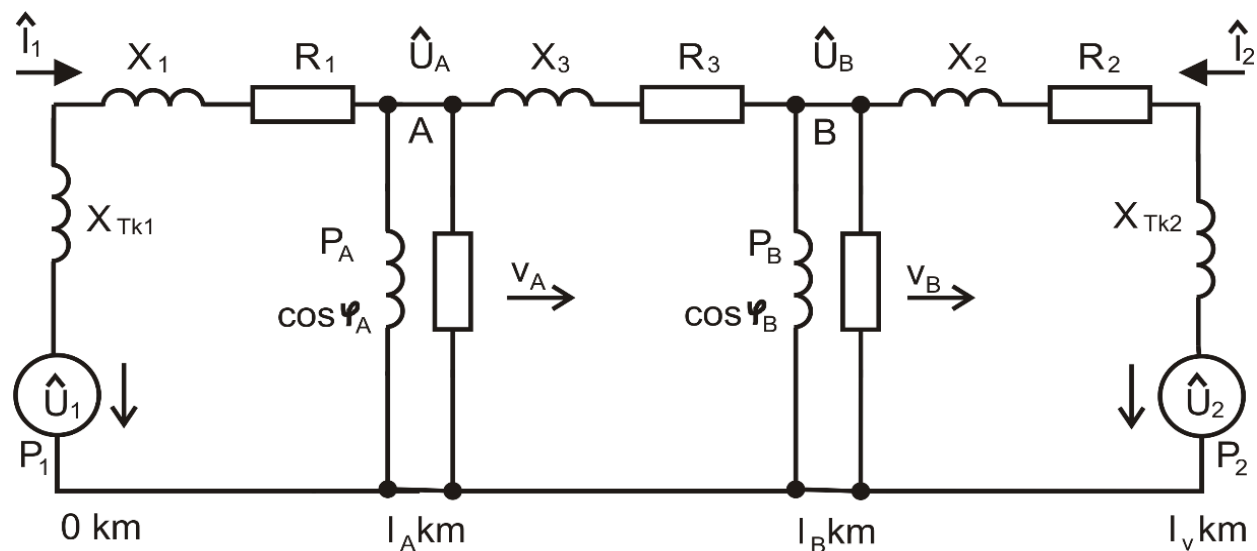
Ověřovací elementární výpočty

Provedeny úvodní ověřovací výpočty se strukturou se dvěma napájecími stanicemi a dvěma vlaky.

Sledovány dva typy závislostí:

Závislosti výkonů napájecích stanic na fázovém posunu napětí napájecích stanic

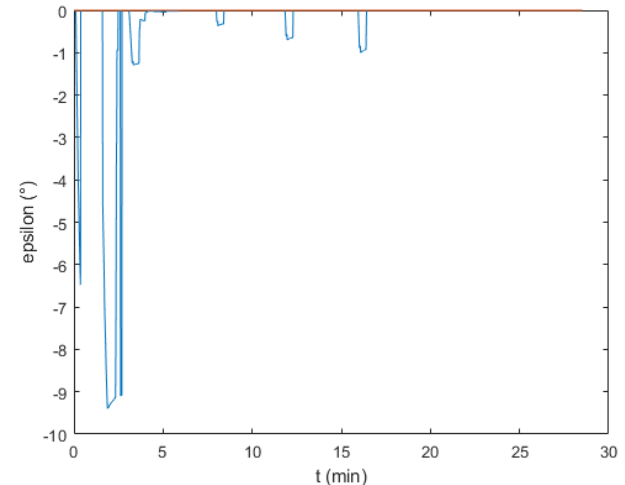
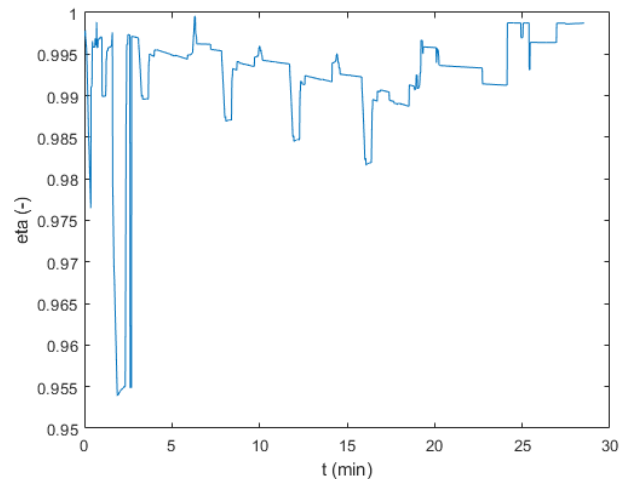
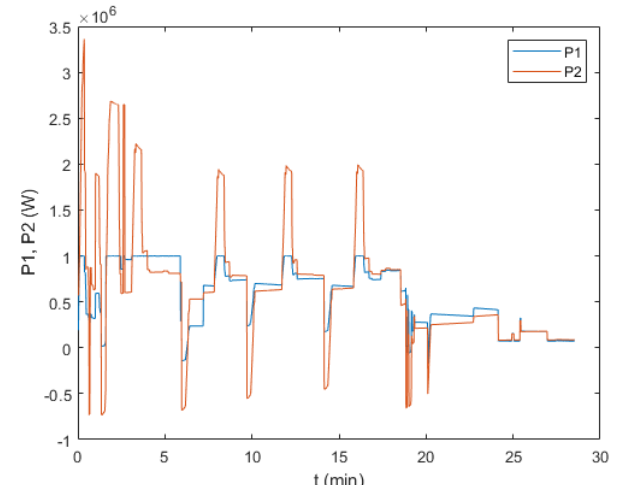
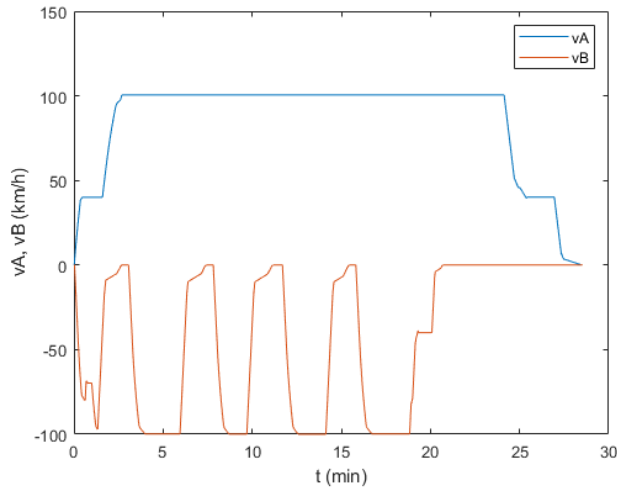
Časové závislosti výkonů napájecích stanic a účinností přenosu výkonu trakční sítě



Ověřovací elementární výpočty

Příklady výsledků ověřovacích výpočtů

Časové závislosti veličin při jízdě dvou vlaků v opačném směru-omezení výkonu první stanice na 1MW



Tvorba architektury SW, tvorba formátu vstupních a výstupních dat

Charakteristika architektury SW:

Výpočet rozložen do 7 SW modulů:

- Čtení a přepočítání vstupního formuláře .xlsx zadání
- Hlavní časová smyčka
- Výpočet jízdy vlaků
- Uplatnění kritéria řízení, výpočet řízení
- Sestavení obvodových rovnic metodou uzlových napětí a jejich řešení
- Zpracování výstupních dat a příprava výstupních polí
- Převod výstupních polí na soubor .xlsx

Předpoklady výpočtů:

- Frekvence napětí a proudů je 50 Hz
- Uvažuje se harmonický ustálený stav, uvažují se jen 1. harmonické složky veličin
- Uvažuje se lineární obvod – odpory a indukčnosti jsou konstantní
- U vnitřní impedance zdrojů se uvažuje reaktanční složka (reaktance nakrátko transformátoru)
- Uvažují se odpory a indukčnosti trakčního vedení, zanedbává se impedance zpětné cesty, kolejnice tvoří společný referenční potenciál

Vstupní data výpočtů:

- Data napájecích stanic (napětí, reaktance, umístění v obvodu, mezní výkon, možnost regulace výkonu A/N)
- Struktura tratí formou zadání traťových úseků (počátek, konec, délka, impedance vedení)
- Data vlaků (časové závislosti rychlostí a příkonů na sběrači po 1 s, vytyčení trasy vlaků po traťových úsecích se specifikací kilometráže trasy)
- Perioda výpočtu obvodových rovnic

Vstupní data výpočtů – příklad výřezu zadávacího formuláře:

Napájecí stanice	Uzel č.	Reaktance NS (Ohm)	Napětí NS (V)	Mezní výkon NS (MW)	Reg. NS		Čas (s)	vlak1 v(km/h)	vlak1 P(kW)	vlak1 cosfi	Trasa po trati	Poč. km	Konc. km
	1	20.001	27000	2	1		1	70	12000.99		2	10	0
	2	40.001	27001	3	1		2	70	12000.99		3	0	17
	3	37.5	27002	5	0		3	70	12000.99		5	0	10
							4	70	12000.99		7	0	8
							5	70	12000.99				
							6	70	12000.99				
							7	70	12000.99				
							8	70	12000.99				
							9	70	12000.99				
							10	70	12000.99				
							11	70	12000.99				
							12	70	12000.99				
							13	70	12000.99				
							14	70	12000.99				

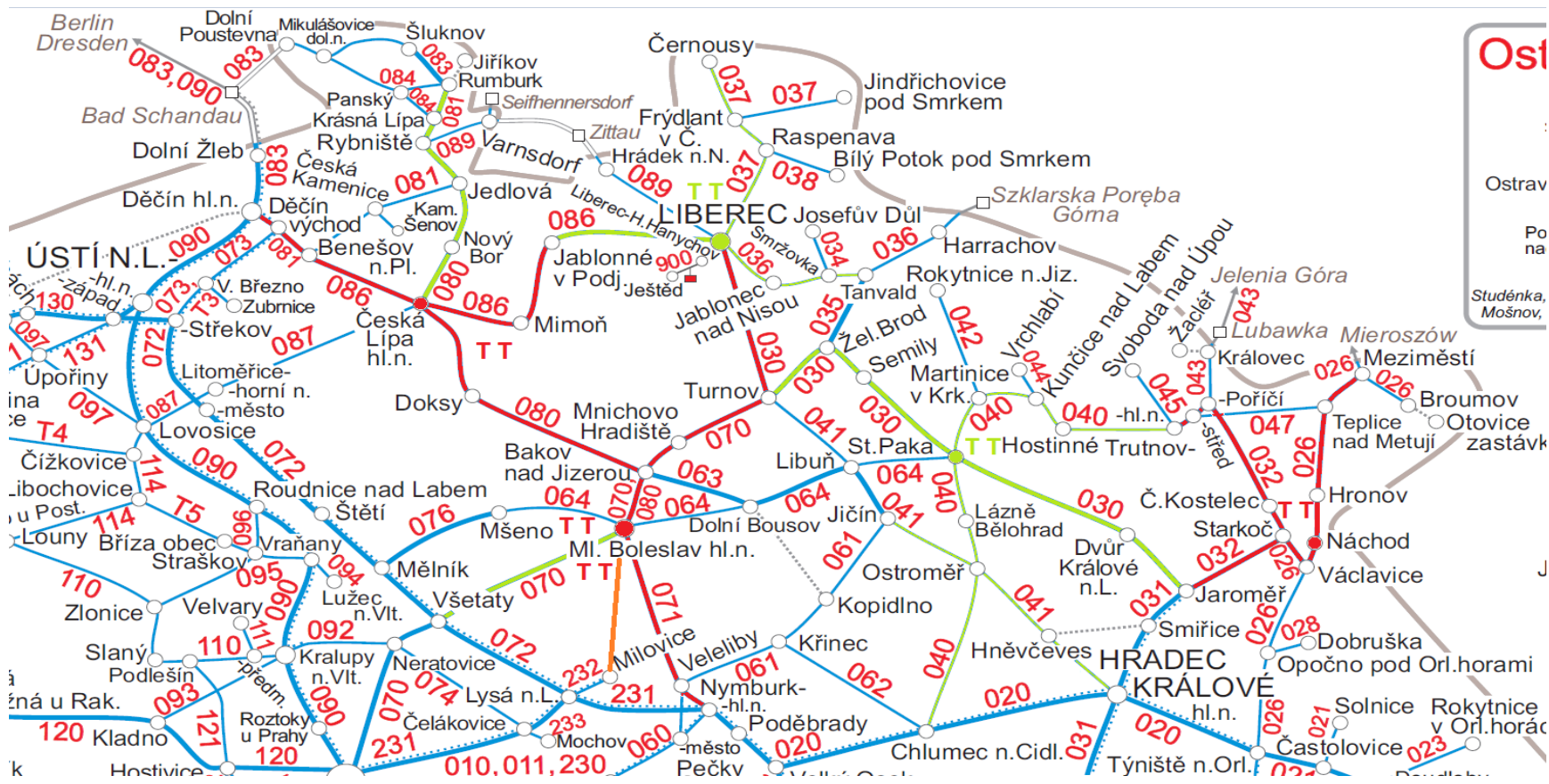
Výstupní data výpočtů – časové závislosti:

- Dodané výkony a energie
- Spotřebované výkony a energie
- Celkové účinnosti přenosu a celkové ztráty
- Výkony, energie a proudy napájecích stanic
- Průběhy napětí traťových uzlů
- Pozice vlaků
- Napětí vlaků na sběrači
- Veličiny charakterizující akční zásahy řízení měničových stanic

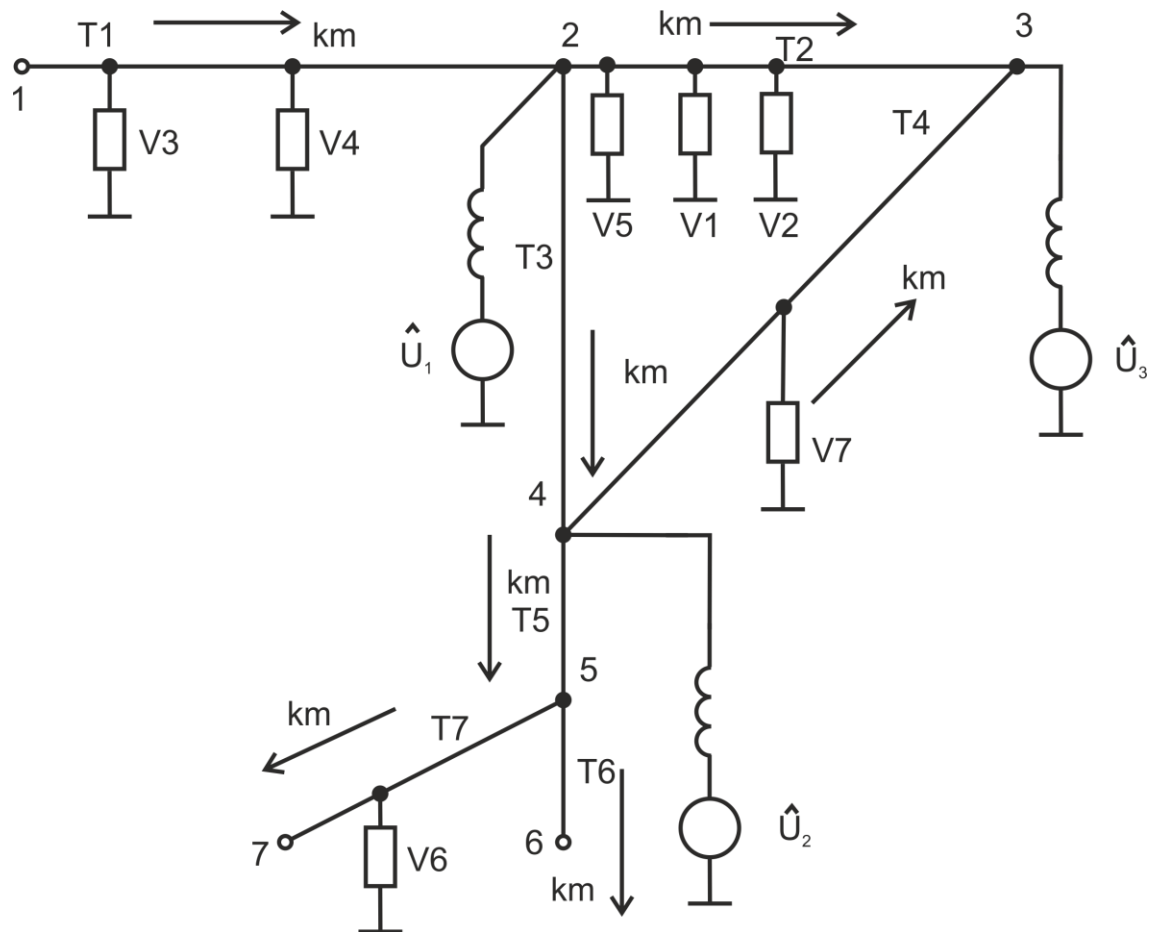
Preferovaná oblast pro výpočty:

Koncepční rozbor souvislé elektrifikace tratí s měničovými stanicemi v modelovém území

Na základě rozboru provozu v území byly vytipovány tratě vhodné k elektrifikaci ve dvou etapách (konzultace se SŽ)



Příklady výsledků testovacích výpočtů – výpočet časových závislostí veličin při jízdách vlaků

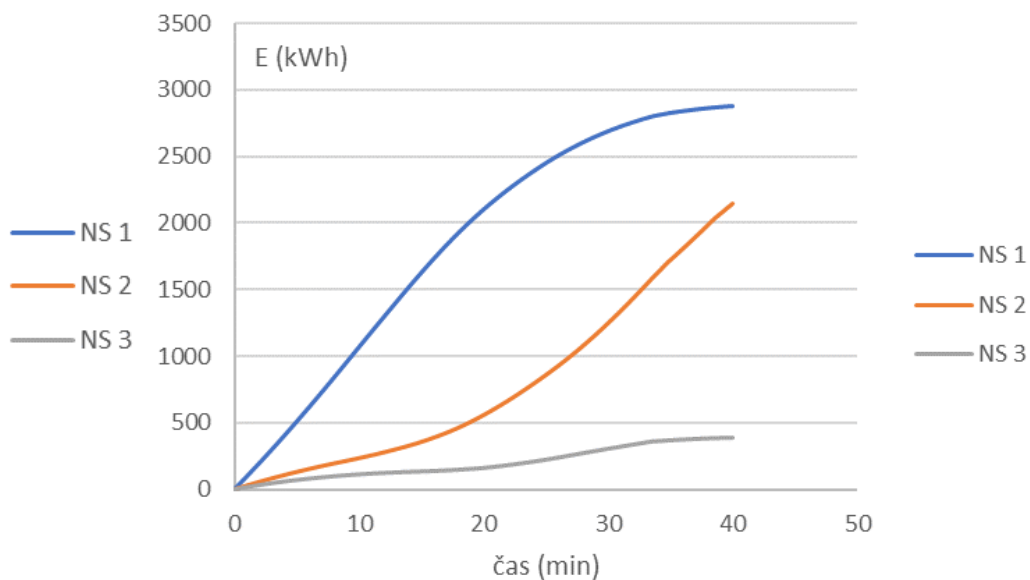
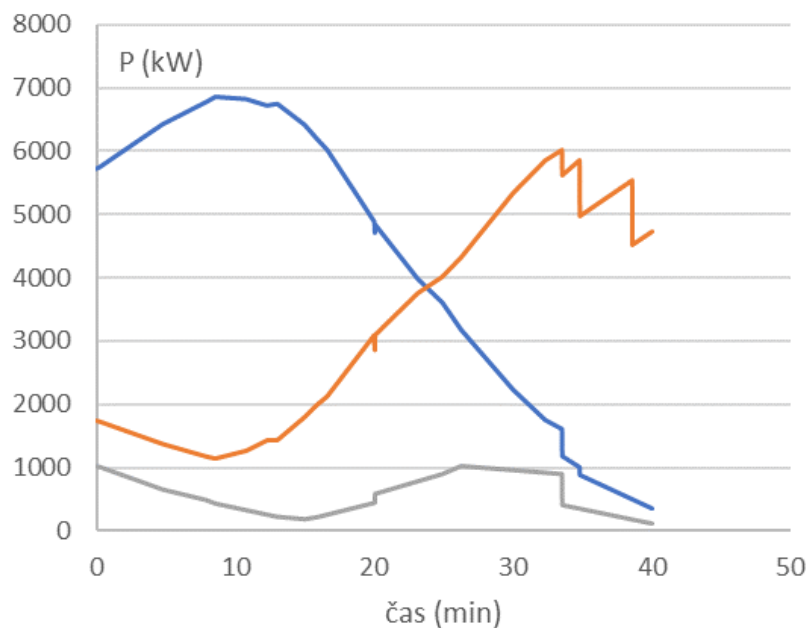


Příklady výsledků testovacích výpočtů – výpočet časových závislostí veličin při jízdách vlaků – příklad výstupního souboru dat

Cas (s)	Cas (min)	0	Celk.ucinnost(%)	Celk.ztraty(kW)	Celk.dodany P(kW)	Celk.spotreb.P(kW)	Celk.P vlaku(kW)	Celk.P NS(kW)	Celk.ztrat.E(kWh)	Celk.dodana E(kWh)	Celk.spotreb.E(kWh)	Celk.E vlaku(kWh)	Celk.E NS(kWh)	Celk.E ucinnost(%)
1	0,016666667	0	98,94075548	89,92910871	8489,929109	8400	8400	8489,929109	0,024980308	2,358313641	2,333333333	2,333333333	2,358313641	98,94075548
2	0,033333333	0	98,94179106	89,84024881	8489,840249	8400	8400	8489,840249	0,049935933	4,716602599	4,666666667	4,666666667	4,716602599	98,94127327
3	0,05	0	98,94282811	89,75126374	8489,751264	8400	8400	8489,751264	0,074866839	7,074866839	7	7	7,074866839	98,94179154
4	0,066666667	0	98,94386665	89,6621535	8489,662154	8400	8400	8489,662154	0,099772993	9,433106326	9,333333333	9,333333333	9,433106326	98,94231031
5	0,083333333	0	98,944707	89,59004934	8489,590049	8400	8400	8489,590049	0,124659118	11,79132578	11,66666667	11,66666667	11,79132578	98,94278964
6	0,1	0	98,94534825	89,5350297	8489,53503	8400	8400	8489,53503	0,149529959	14,14952996	14	14	14,14952996	98,94321607
7	0,116666667	0	98,94598975	89,47998947	8489,479989	8400	8400	8489,479989	0,174385512	16,50771885	16,33333333	16,33333333	16,50771885	98,9436123
8	0,133333333	0	98,94663149	89,42492866	8489,424929	8400	8400	8489,424929	0,19922577	18,86589244	18,66666667	18,66666667	18,86589244	98,94398969
9	0,15	0	98,94727349	89,36984727	8489,369847	8400	8400	8489,369847	0,224050728	21,22405073	21	21	21,22405073	98,94435454
10	0,166666667	0	98,94791573	89,31474529	8489,314745	8400	8400	8489,314745	0,248860379	23,58219371	23,33333333	23,33333333	23,58219371	98,94471065
11	0,183333333	0	98,94855822	89,25962274	8489,259623	8400	8400	8489,259623	0,273654719	25,94032139	25,66666667	25,66666667	25,94032139	98,94506042
12	0,2	0	98,94920095	89,20447961	8489,20448	8400	8400	8489,20448	0,298433741	28,29843374	28	28	28,29843374	98,94540545
13	0,216666667	0	98,94984394	89,1493159	8489,149316	8400	8400	8489,149316	0,32319744	30,65653077	30,33333333	30,33333333	30,65653077	98,94574686
14	0,233333333	0	98,95068869	89,07684328	8489,076843	8400	8400	8489,076843	0,347941007	33,01460767	32,66666667	32,66666667	33,01460767	98,94609983
15	0,25	0	98,95173613	88,9869833	8488,986983	8400	8400	8488,986983	0,372659614	35,37265961	35	35	35,37265961	98,94647556
16	0,266666667	0	98,95278505	88,89699813	8488,896998	8400	8400	8488,896998	0,397353224	37,73068656	37,33333333	37,33333333	37,73068656	98,94686988
17	0,283333333	0	98,95383546	88,80688777	8488,806888	8400	8400	8488,806888	0,422021804	40,08868847	39,66666667	39,66666667	40,08868847	98,94727959
18	0,3	0	98,95488734	88,71665225	8488,716652	8400	8400	8488,716652	0,446665319	42,44666532	42	42	42,44666532	98,94770222
19	0,316666667	0	98,95594071	88,62629156	8488,626292	8400	8400	8488,626292	0,471283733	44,80461707	44,33333333	44,33333333	44,80461707	98,94813579
20	0,333333333	0	98,95699556	88,53580571	8488,535806	8400	8400	8488,535806	0,495877012	47,16254368	46,66666667	46,66666667	47,16254368	98,94857874
21	0,35	0	98,95805188	88,44519471	8488,445195	8400	8400	8488,445195	0,520445122	49,52044512	49	49	49,52044512	98,9490298
22	0,366666667	0	98,9591097	88,35445857	8488,354459	8400	8400	8488,354459	0,544988027	51,87832136	51,33333333	51,33333333	51,87832136	98,94948793
23	0,383333333	0	98,96016899	88,2635973	8488,263597	8400	8400	8488,263597	0,569505693	54,23617236	53,66666667	53,66666667	54,23617236	98,94995228
24	0,4	0	98,96122976	88,17261089	8488,172611	8400	8400	8488,172611	0,593998085	56,59399809	56	56	56,59399809	98,95042212
25	0,416666667	0	98,96229202	88,08149937	8488,081499	8400	8400	8488,081499	0,618465168	58,9517985	58,33333333	58,33333333	58,9517985	98,95089686
26	0,433333333	0	98,96335575	87,99026273	8487,990263	8400	8400	8487,990263	0,642906908	61,30957357	60,66666667	60,66666667	61,30957357	98,95137599
27	0,45	0	98,96442097	87,89890099	8487,898901	8400	8400	8487,898901	0,667323269	63,66732327	63	63	63,66732327	98,95185908
28	0,466666667	0	98,96548767	87,80741415	8487,807414	8400	8400	8487,807414	0,691714218	66,02504755	65,33333333	65,33333333	66,02504755	98,95234575
29	0,483333333	0	98,96655585	87,71580223	8487,715802	8400	8400	8487,715802	0,716079718	68,38274638	67,66666667	67,66666667	68,38274638	98,95283568
30	0,5	0	98,96762552	87,62406522	8487,624065	8400	8400	8487,624065	0,740419736	70,74041974	70	70	70,74041974	98,95332861
31	0,516666667	0	98,96869666	87,53220314	8487,532203	8400	8400	8487,532203	0,764734237	73,09806757	72,33333333	72,33333333	73,09806757	98,95382428
32	0,533333333	0	98,96976929	87,440216	8487,440216	8400	8400	8487,440216	0,789023186	75,45568985	74,66666667	74,66666667	75,45568985	98,95432248
33	0,55	0	98,97084339	87,34810381	8487,348104	8400	8400	8487,348104	0,813286548	77,81328655	77	77	77,81328655	98,95482303
34	0,566666667	0	98,97191898	87,25586656	8487,255867	8400	8400	8487,255867	0,837524289	80,17085762	79,33333333	79,33333333	80,17085762	98,95532577
35	0,583333333	0	98,97299605	87,16350428	8487,163504	8400	8400	8487,163504	0,861736374	82,52840304	81,66666667	81,66666667	82,52840304	98,95583055

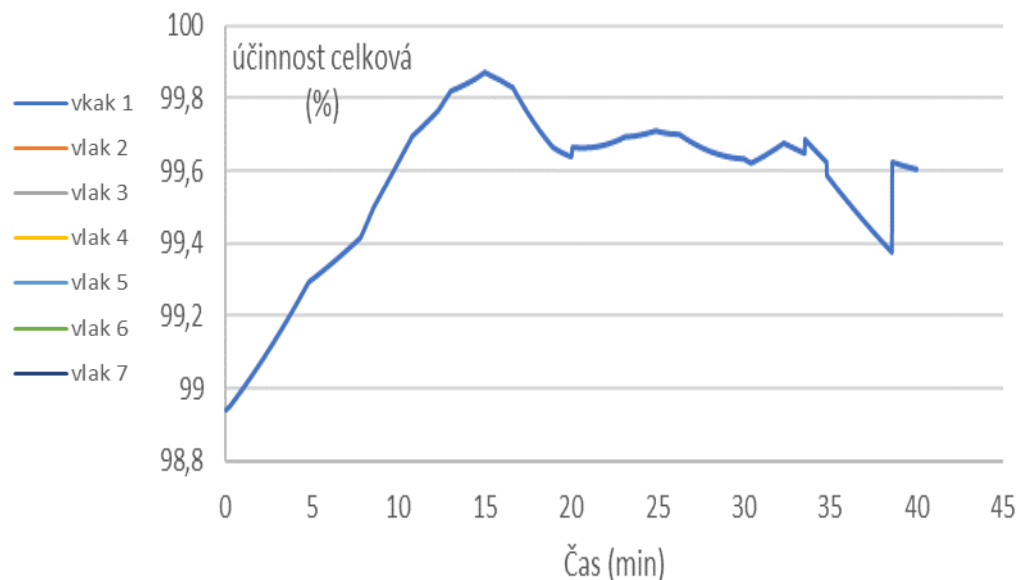
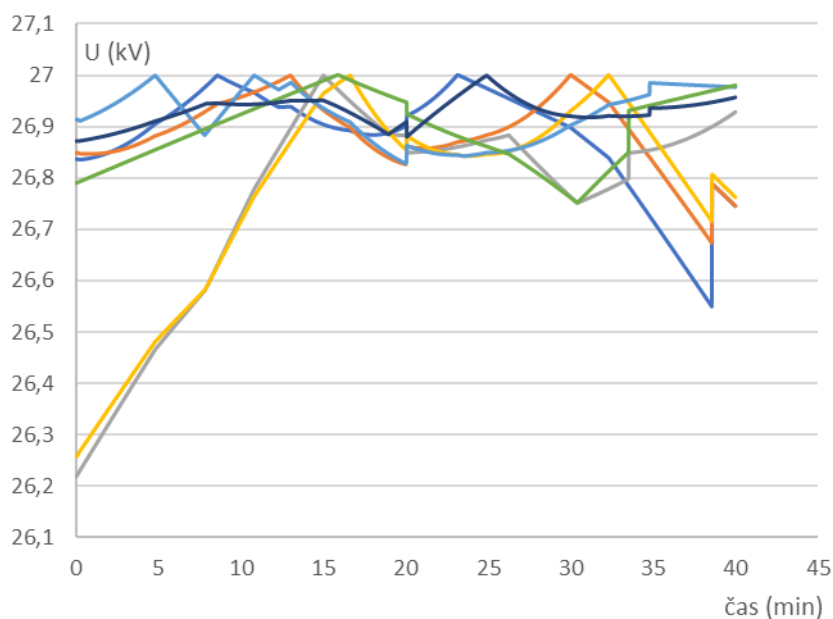
Příklady výsledků testovacích výpočtů

Výpočet časových závislostí veličin při jízdách vlaků –
příklad časových závislostí výstupních veličin (výkony a energie napájecích stanic)

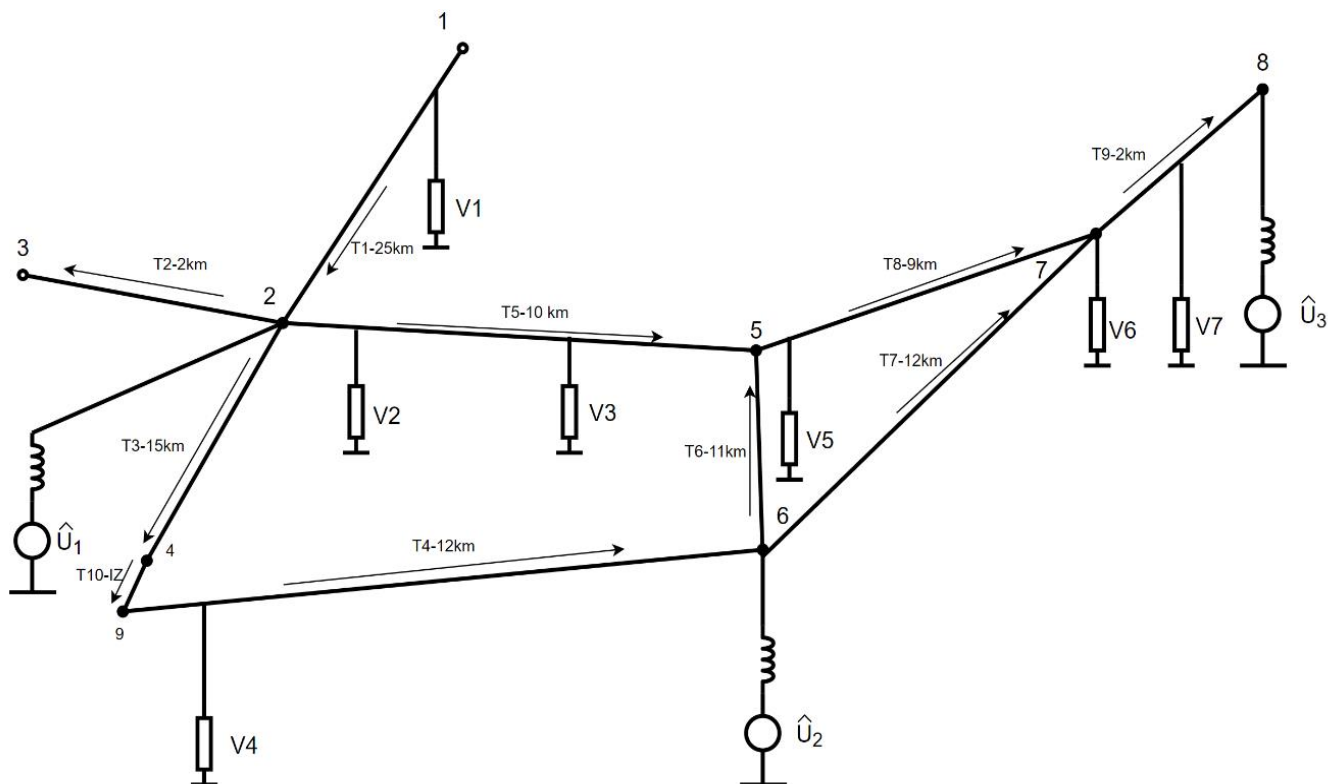


Příklady výsledků testovacích výpočtů

Výpočet časových závislostí veličin při jízdách vlaků –
příklad časových závislostí výstupních veličin (průběhy
napětí na sběračích vlaků, průběh účinnosti přenosu
výkonu přes trakční vedení)



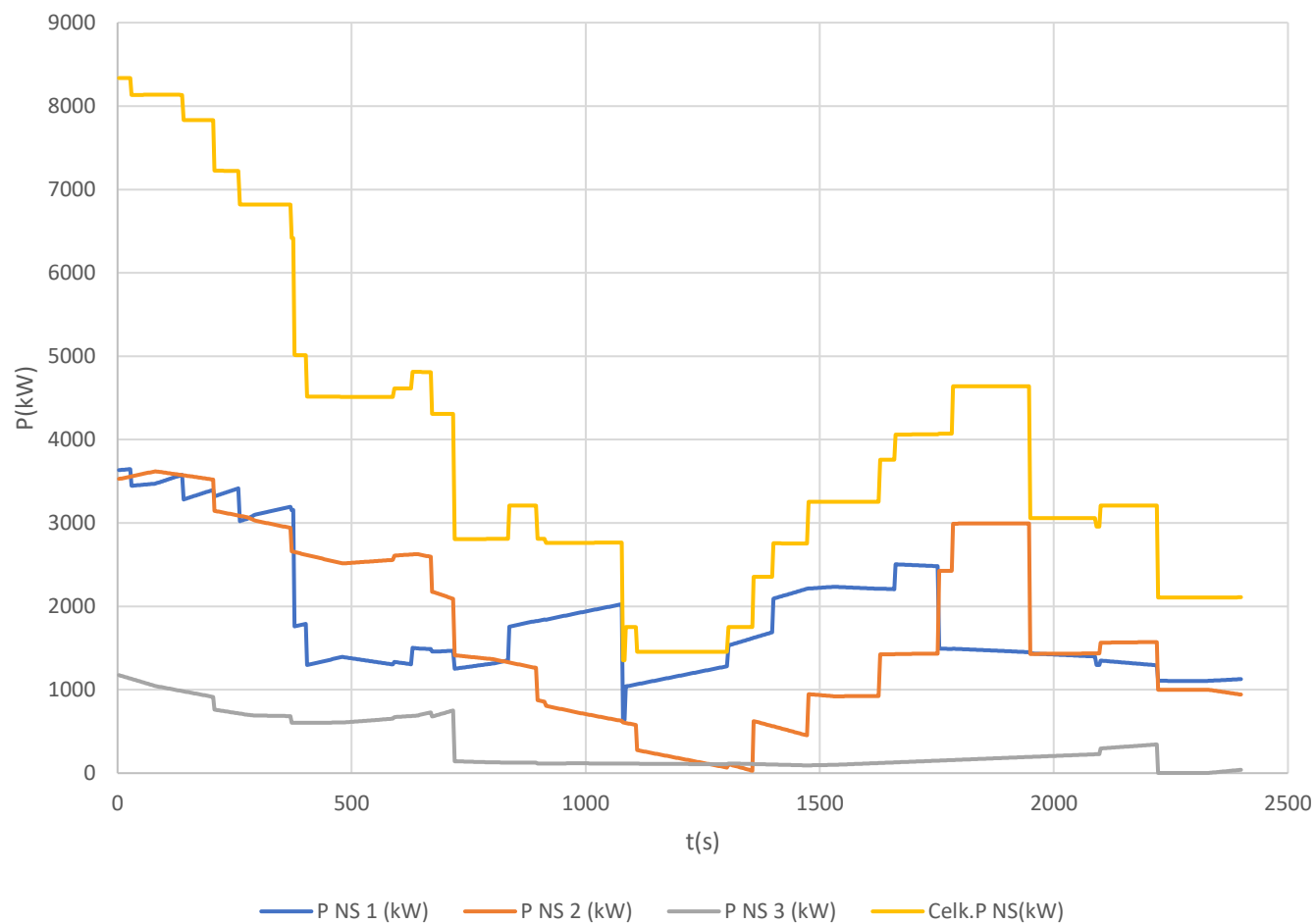
Příklady výsledků testovacích výpočtů



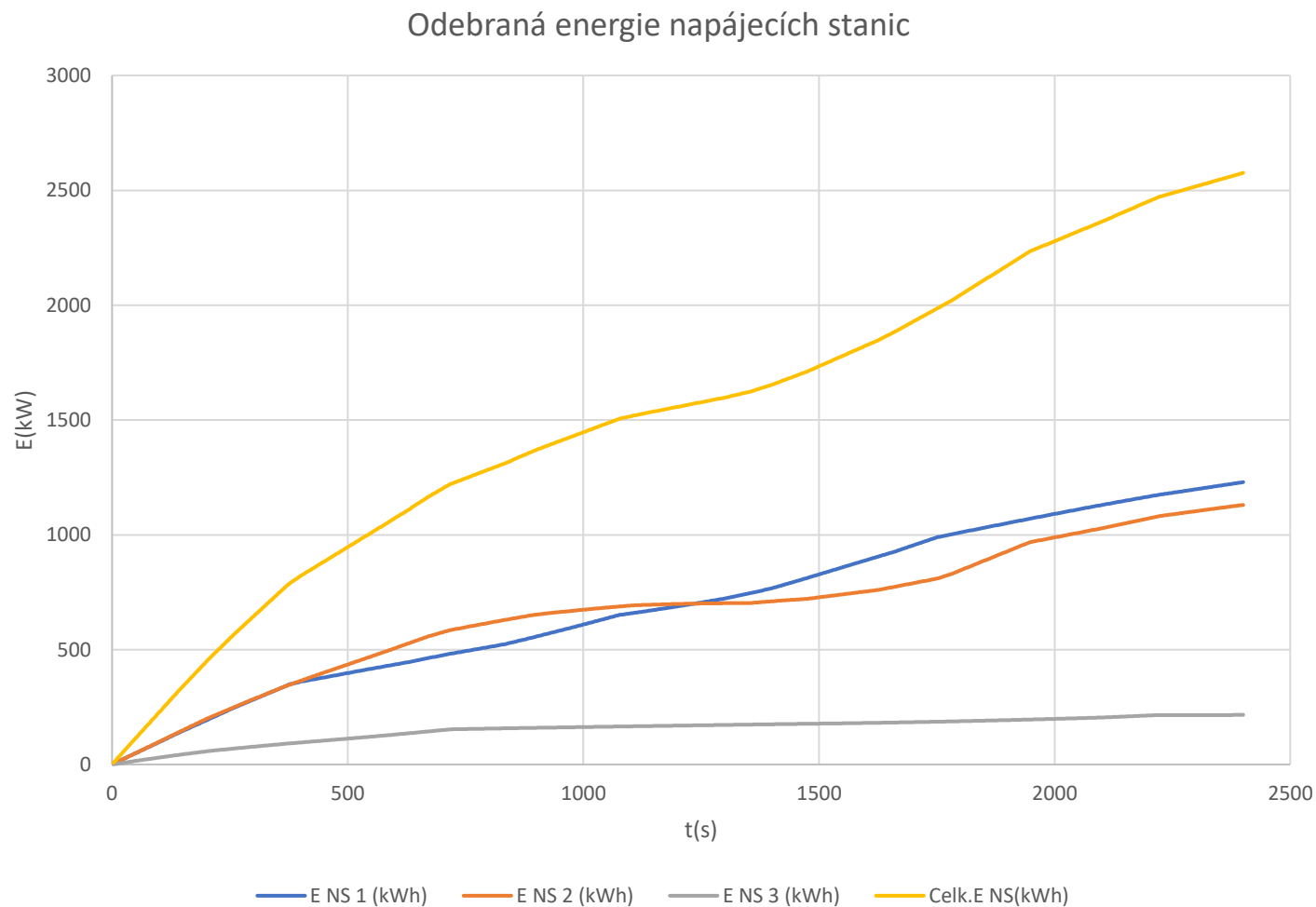
Vlak	Trať	Km _c	Km _c	Trať	Km _c	Km _c	Trať	Km _c	Km _c	Trať	Km _c	Km _c	Stop t(s)
V1	1	5	25	3	0	15	4	0	12	7	0	1	2400
V2	5	3	10	8	0	9	0	2					720
V3	5	7	0	2	0	2							378
V4	4	2	12	6	0	11	8	0	8				2224
V5	8	2	0	5	10	0	3	0	15				1080
V6	7	12	0	4	12	0							1950
V7	9	1	0	8	9	0	5	10	0	1	25	16	2400

Příklady výsledků testovacích výpočtů

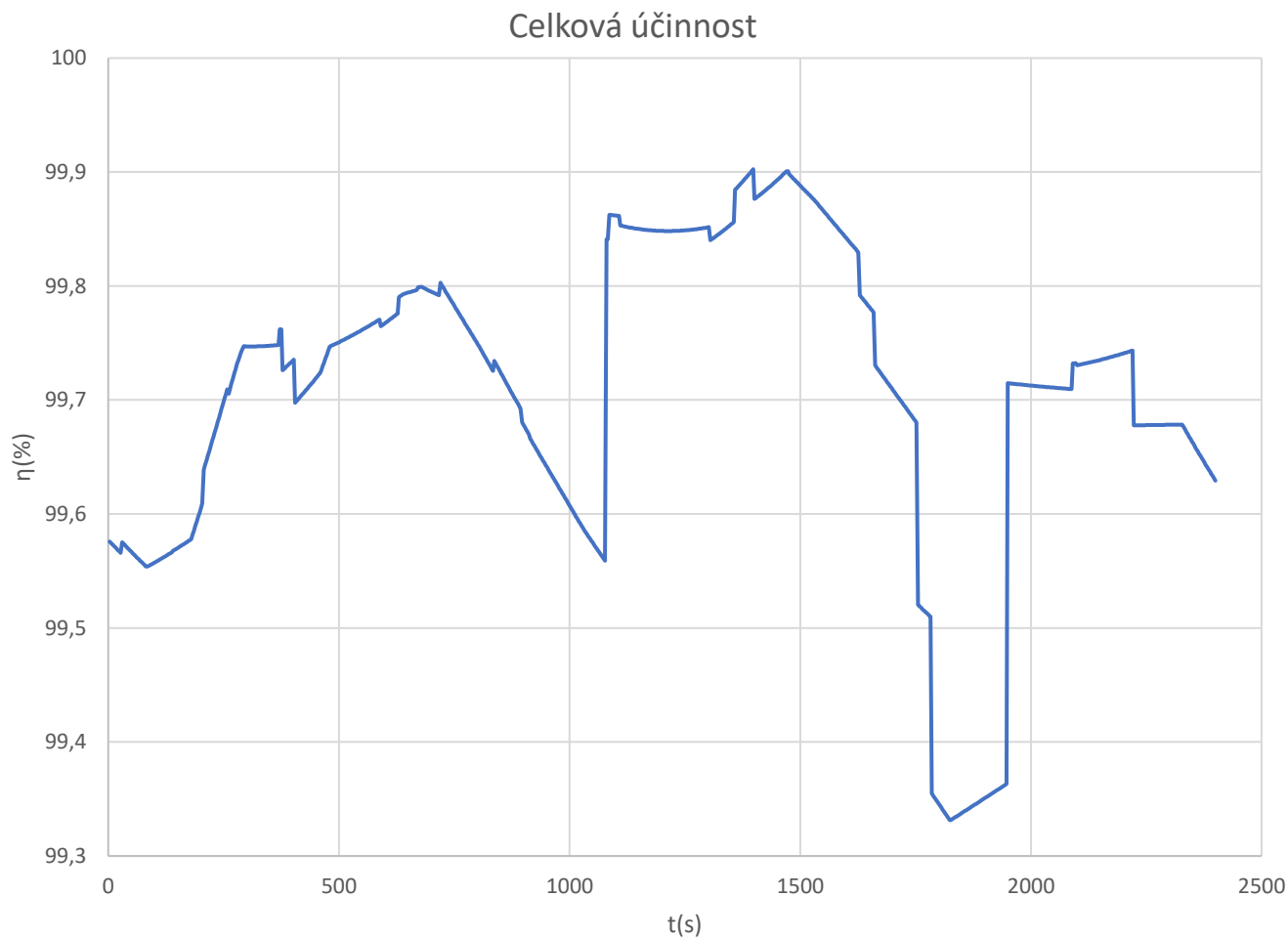
Odebíraný výkon napájecích stanic



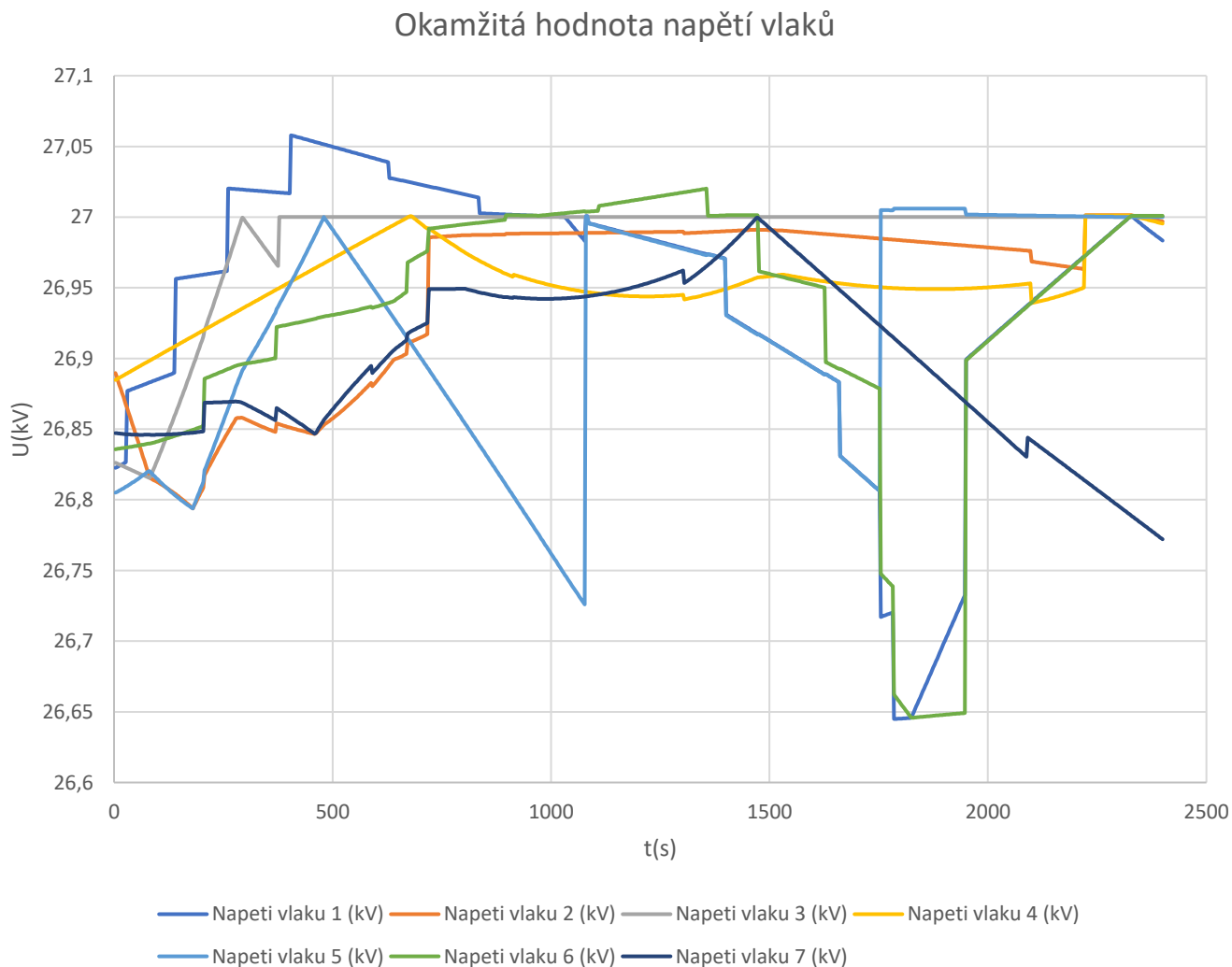
Příklady výsledků testovacích výpočtů



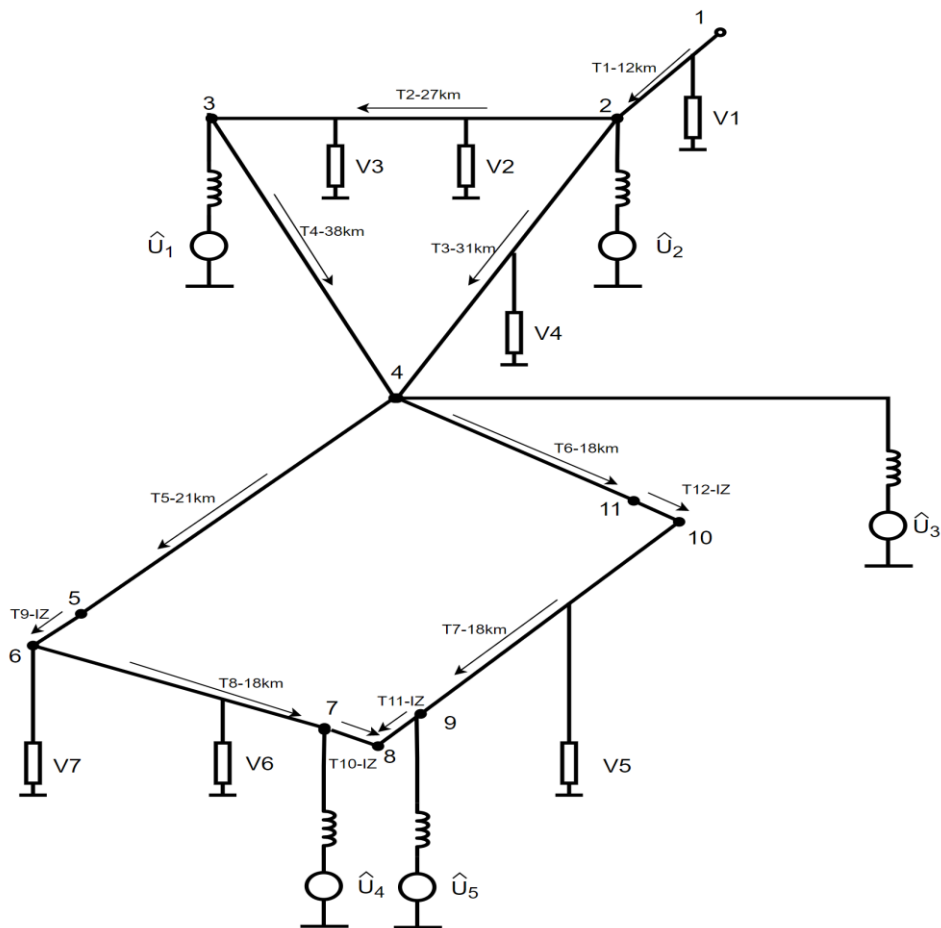
Příklady výsledků testovacích výpočtů



Příklady výsledků testovacích výpočtů

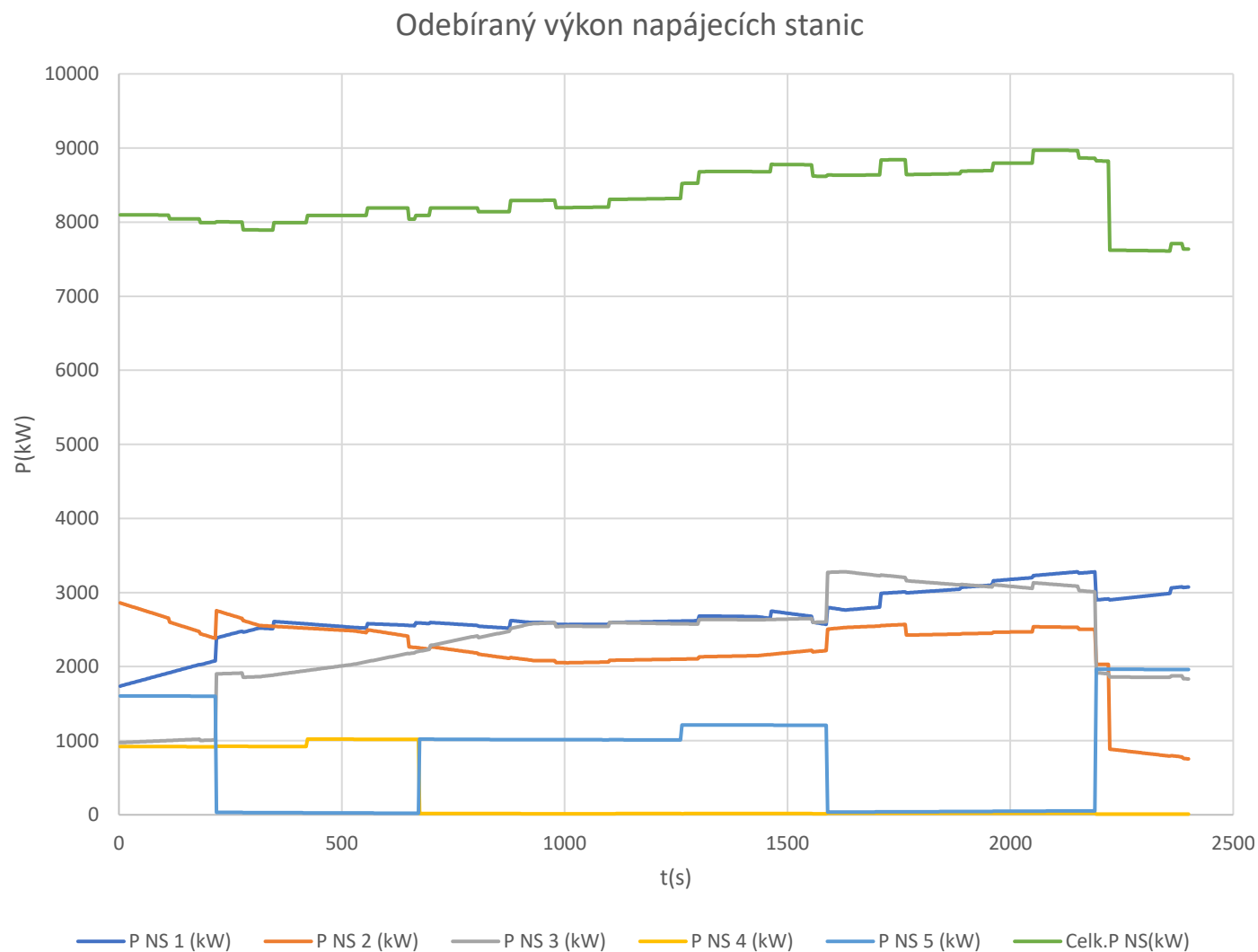


Příklady výsledků testovacích výpočtů

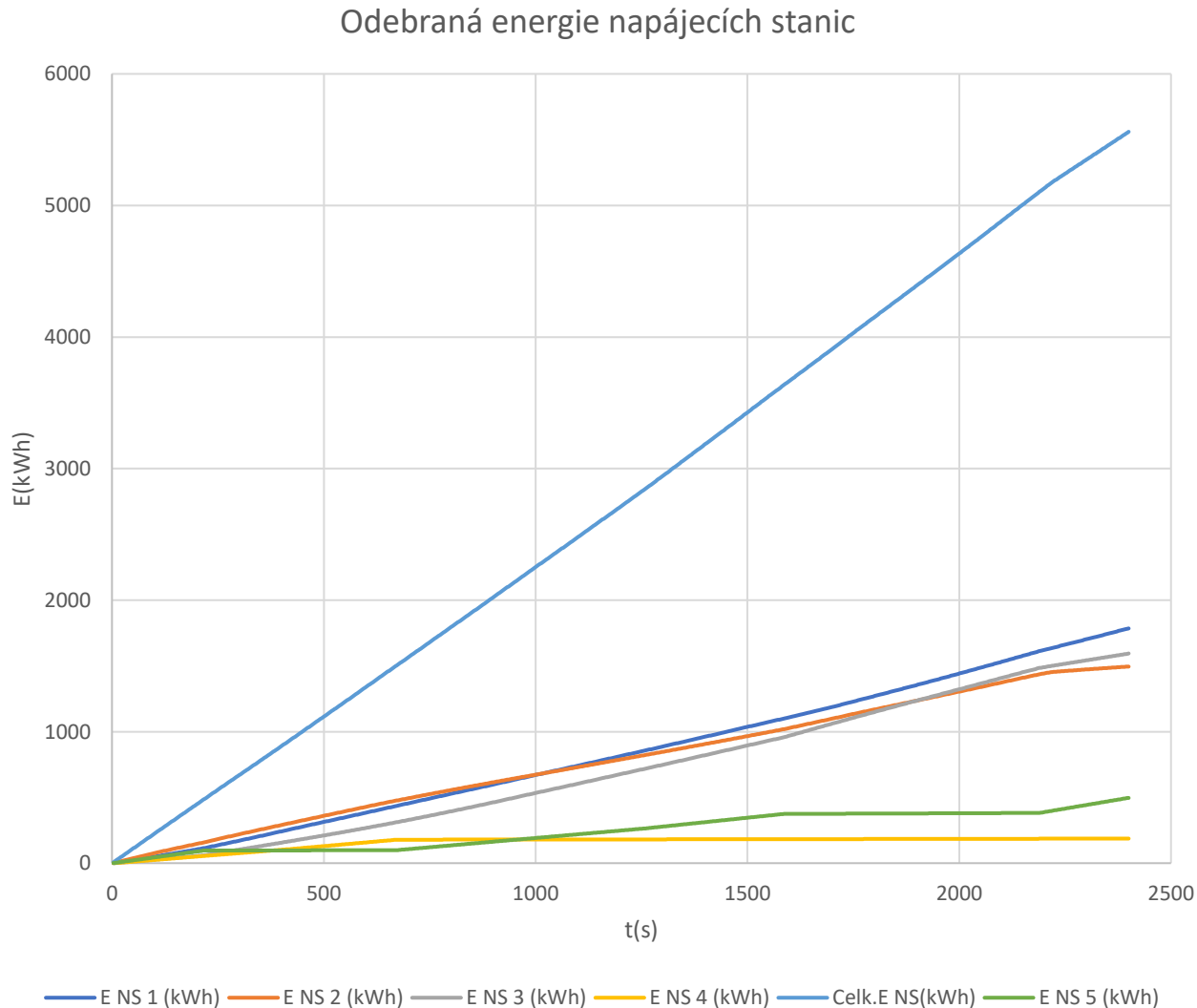


Vlak	Trat'	Km _s	Km _c	Trat'	Km _s	Km _c	Trat'	Km _s	Km _c	Trat'	Km _s	Km _c	Stop_t(s)
V1	1	2	12	3	0	30							2400
V2	2	10	27	4	0	15							2400
V3	2	20	27	4	0	38	6	0	18	7	0	18	2400
V4	3	16	31	4	0	25							2400
V5	7	6	0	6	18	0	3	31	2				2222
V6	8	6	18	7	18	0	6	18	4				2400
V7	5	21	0	4	38	5							2400

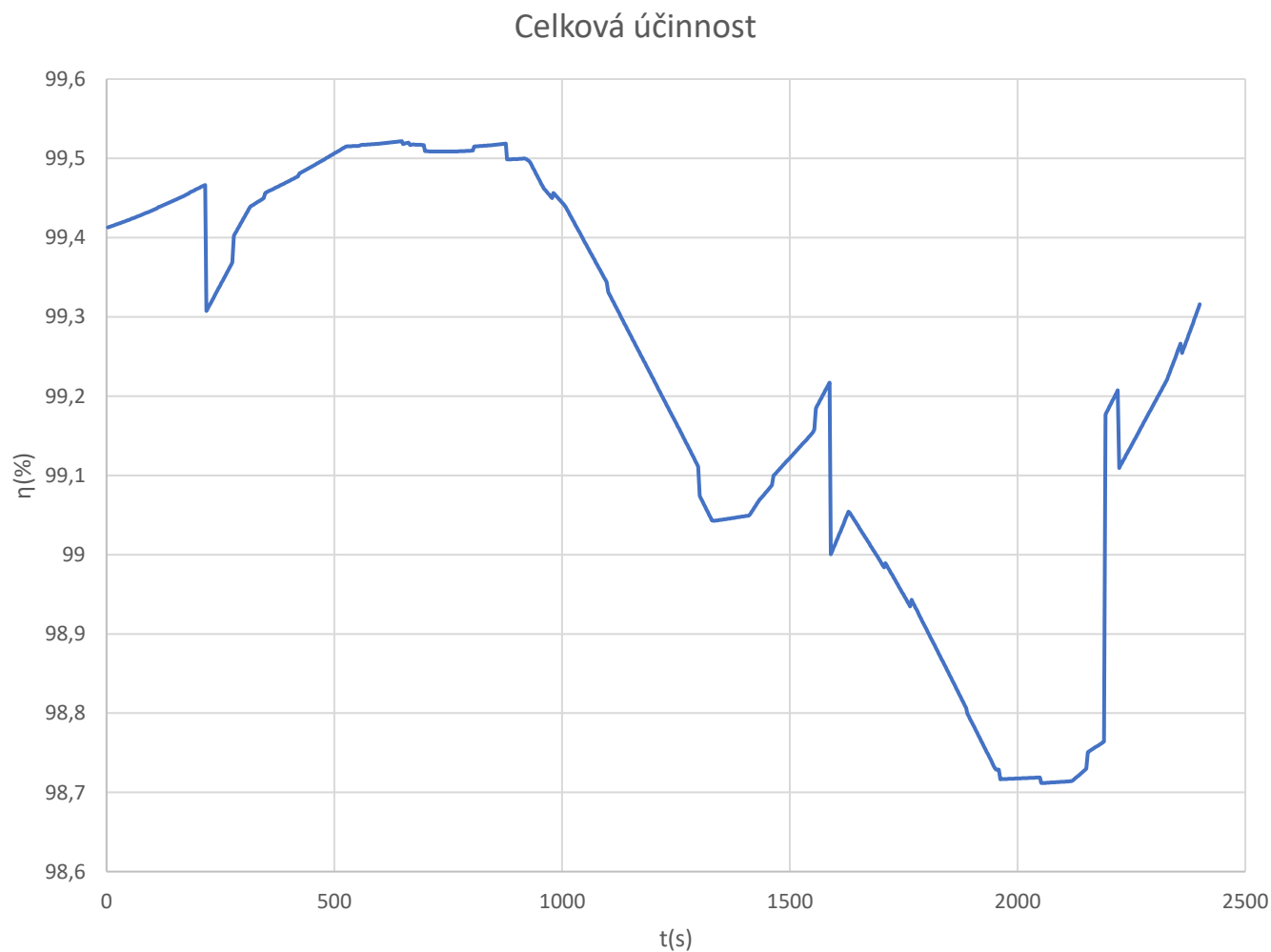
Příklady výsledků testovacích výpočtů



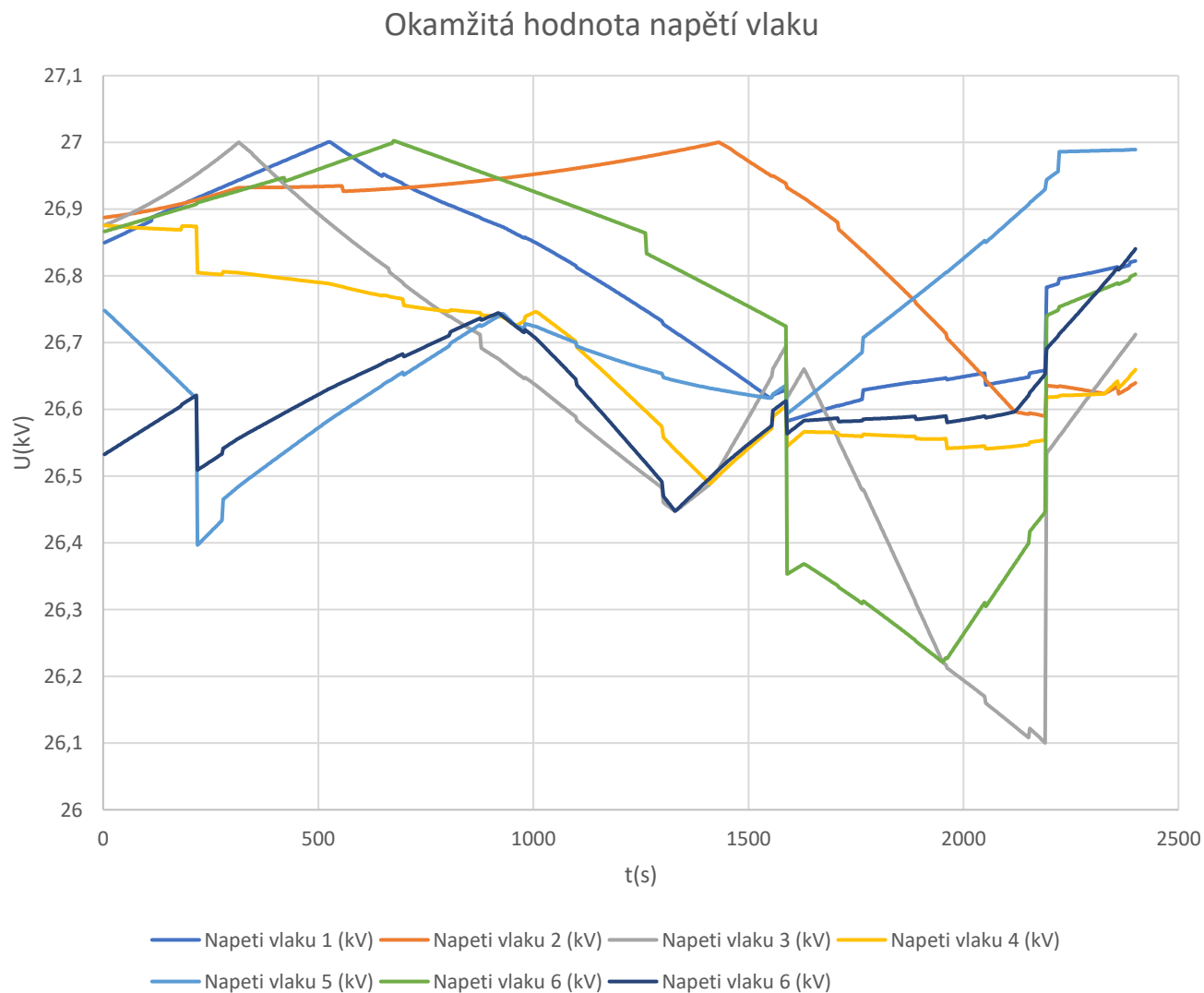
Příklady výsledků testovacích výpočtů



Příklady výsledků testovacích výpočtů



Příklady výsledků testovacích výpočtů



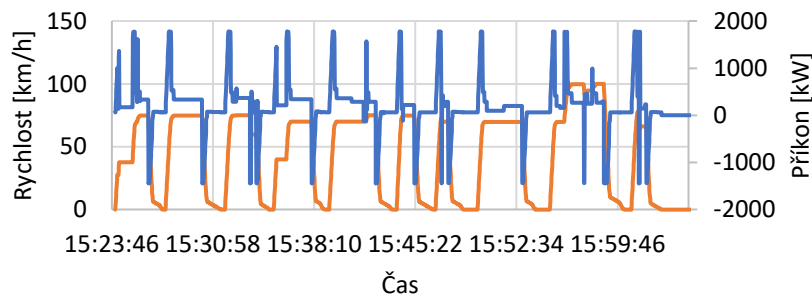
Zkušenosti s testováním SW a další postup

- Doba výpočtu simulace je nezanedbatelná, časově nejnáročnější je řešení soustavy obvodových rovnic (počet rovnic = počet uzlů tratí + počet napájecích stanic + počet vlaků). Např. doba výpočtu pro 7 traťových uzlů + 7 vlaků, perioda 1 s, je přibližně 3x delší, než simulovaný reálný časový interval.
- Připravovány podrobné simulace pro výřez tratí v SV Čechách (např. tratě Děčín – Jablonné v Podještědí + Č. Lípa – Nymburk = 19 x Os + R, 11 nákl., dvouhodinový scénář provozu).
- V současnosti jsou vyvíjeny implementace SW modulů pro různé varianty synchronizovaného řízení)

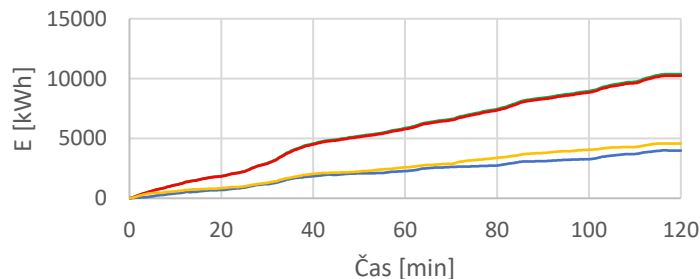
Příklad SW výpočtů na tratích v SV Čechách

(Z diplomové práce: P. Žižlavský: Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz, doba simulovaného provozu 2h, 30 vlaků na tratích Děčín – Jablonné v Podještěčí a Č. Lípa – Nymburk, NS M. Boleslav – transformátorová, Č. Lípa - měničová)

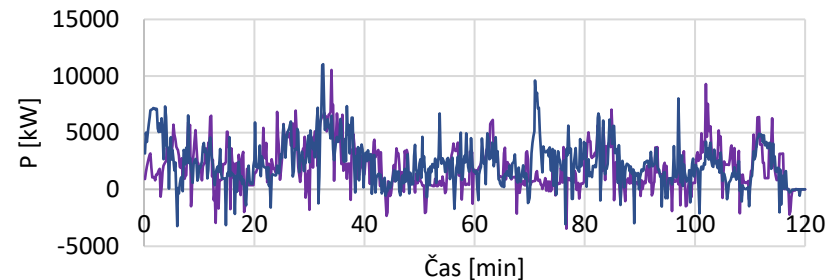
Jízdní profil vlaku Os 6625



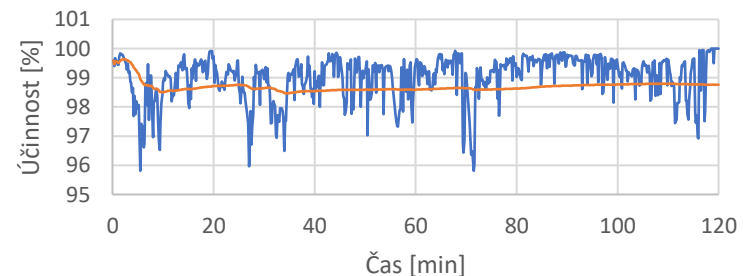
Energie



Zatížení napájecích stanic



Účinnost



Děkuji za pozornost