

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

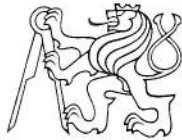
Simulace dynamických jevů v nádrži Kamýk

Dynamic Waves Simulation in the Kamýk Reservoir

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

květen 2016

Bc. Tereza MÜHLHANSLOVÁ



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby
akademický rok: 2015/2016

Jméno a příjmení diplomanta: Bc. Tereza Mühlhanslová
Zadávající katedra: Katedra hydrotechniky
Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur
Název diplomové práce: Simulace dynamických jevů v nádrži Kamýk
Název diplomové práce
v anglickém jazyce: Dynamic waves simulation in the Kamýk reservoir

Rámcový obsah diplomové práce: Špičková vodní elektrárna Orlik vyvolává vlivem svého provozního režimu dynamické průtokové vlny ve vyrovnávací nádrži Kamýk, které také ovlivňuje režim vodní elektrárny Kamýk. Energetické využití obou vodních elektráren je omezeno kótami maximální a minimální hladiny vyrovnávacího prostoru v nádrži Kamýk. Cílem diplomové práce je v první fázi kalibrovat a verifikovat matematický model neustálého proudění na podkladě provozních dat obou vodních elektráren. V další fázi se diplomová práce zaměří na simulaci různých provozních režimů obou vodních elektráren pro potřeby parametrizace dynamických jevů v nádrži Kamýk.

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2016 Termín odevzdání: 22.5.2016
(vyplňte poslední den výuky přísl. semestru)

Diplomovou práci lze zapsat, kromě oboru A, v letním i zimním semestru.

Pokud student neodevzdal diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat diplomovou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu diplomovou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č.111/1998 (SZŘ ČVUT čl 21, odst. 4).

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

.....
vedoucí diplomové práce

.....
vedoucí katedry

Zadání diplomové práce převzal dne: 25.2.2016

.....
diplomant

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“

V Praze, dne 22. 5. 2016

Bc. Tereza Mühlhanslová

Poděkování

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Pavlu Fušumpaurovi za odborné vedení, rady a čas, který věnoval konzultacím a za vstřícný přístup během celého mého studia.

Ráda bych poděkovala Ing. Jiřímu Šumberovi, PhD. za ochotné jednání a spolupráci v průběhu zpracování diplomové práce.

Velké poděkování náleží mé rodině za podporu během celé doby mého studia.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá odvozením matematických rovnic, které popisují průběh amplitud dynamických vln vznikajících v nádrži Kamýk vlivem provozu vodních elektráren Orlík a Kamýk. Nádrž Kamýk se nachází na řece Vltavě ve Středočeském kraji. Správcem přehrad Orlík a Kamýk je Povodí Labe, státní podnik. Provozovatelem obou vodních elektráren je ČEZ, a.s. V programu HEC – RAS 4. 1. 0 je vytvořen 1D hydraulický model nádrže, v němž jsou provedeny simulace pro různé provozní režimy obou vodních elektráren. Na základě výsledků ze simulací jsou sestaveny matematické funkce popisující průběh kladných a záporných amplitud dynamických vln.

KLÍČOVÁ SLOVA

Neustálené proudění, dynamické vlny, vodní elektrárna, vodní nádrž

ANNOTATION

The Master's thesis deals with the determination of mathematical equations describing amplitudes of the dynamic waves occurring in the Kamýk Reservoir as a result of the operation of the Orlík and Kamýk Hydropower Plants. The Kamýk Reservoir is situated on the Vltava River in the Central Bohemian Region. The Orlík Dam and the Kamýk Dam are both managed by Povodí Vltavy, state enterprise. Both hydropower plants are managed by ČEZ, plc. A 1D hydraulic model of the reservoir is built up using HEC – RAS 4. 1. 0. software, then used to simulate different operation modes of both hydropower plants. The determination of the mathematical equations is based on the model results.

KEY WORDS

Unsteady flow, dynamic waves, hydropower plant, water reservoir

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	POUŽITÉ PODKLADY	6
2.1	Výrobní režimy VE Orlík a VE Kamýk	6
2.2	Matematický 1D model VN Kamýk	11
2.3	Technické podklady	12
3	METODIKA ŘEŠENÍ.....	13
3.1	Matematický výpočet neustáleného proudění.....	13
3.1.1	Rovnice kontinuity	14
3.1.2	Pohybová rovnice	14
3.2	Metodika odečtení vlastností dynamických vln.....	15
3.3	Bilanční rovnice pro stanovení konečné ustálené hladiny	16
3.4	Tvar matematické funkce pro průběh amplitud	16
4	POUŽITÝ SOFTWARE	18
4.1	HEC-RAS (verze 4.1.0)	18
4.2	SW Microsoft Office Excel – Řešitel	18
5	POPIS LOKALITY	19
5.1	VD Kamýk	19
5.2	VD Orlík	20
6	VÝPOČET PRŮBĚHU VLN V HEC-RAS (MODELOVÁNÍ).....	22
6.1	Vstupní data	22
6.1.1	Geometrická data	22
6.1.2	Okrajové podmínky	22
6.1.3	Počáteční podmínka.....	22
6.2	Kalibrace modelu	23
6.3	Validace modelu	26
6.4	Vliv výchozí hladiny	30
6.5	Simulace provozních režimů VE	33
7	VLASTNOSTI DYNAMICKÝCH VLN	36
7.1	Linearita vlastností dynamických vln	38
8	BILANČNÍ ROVNICE (TEORETICKÁ USTÁLENÁ HLADINA).....	49
9	MATEMATICKÉ FUNKCE PRŮBĚHU AMPLITUD	51

9.1	Koeficient T	51
9.2	Koeficienty $A_0, A_1, -b$	51
9.3	Koeficient t_0	52
9.4	Koeficient φ	53
9.5	Parametr Q	54
9.6	Proměnná t	54
9.7	Ověření správnosti definovaných funkcí	54
10	KONTROLNÍ VÝPOČTY	64
10.1	Kontrolní epizoda 1 – VE Orlík + VE Kamýk (1).....	64
10.2	Kontrolní epizoda 2 – VE Orlík + VE Kamýk (2).....	66
10.3	Kontrolní epizoda 3 – 28.2. – VE Orlík.....	68
10.4	Kontrolní epizoda 4 – 7.3. – VE Orlík + VE Kamýk	69
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	72
12	NÁVRH NA BUDOUCÍ VÝZKUM	76
12.1	Způsob ukončení provozu vodních elektráren.....	76
13	ZÁVĚR.....	80
14	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	82
15	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
16	SEZNAM TABULEK	84
17	SEZNAM GRAFŮ	85

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

HEC – RAS The Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

ŘVC ČR Ředitelství vodních cest České republiky

VD vodní dílo

VE vodní elektrárna

VN vodní nádrž

1 ÚVOD

Předmětem diplomové práce je definovat matematické funkce, které budou popisovat průběh kladných a záporných amplitud dynamických vln, které vznikají na hladině VN Kamýk v důsledku výrobních režimů VE Orlík a VE Kamýk.

VN Kamýk se nachází ve Středočeském kraji, okrese Příbram, nad obcí Kamýk nad Vltavou. Vzduť nádrže dosahuje k vývaru VD Orlík. Vodní nádrž byla vytvořena zejména pro vyrovnávání kolísavých přítoků z VE Orlík. Obě vodní díla jsou součástí Vltavské kaskády a jejich správcem je Povodí Vltavy, státní podnik. Provozovatelem VE Kamýk a VE Orlík je ČEZ, a.s. VD Orlík je největším vodním dílem na území České republiky a s maximálním spádem cca 70 m má velký hydroenergetický potenciál. VE Orlík se tak významně podílí na řízení celostátní energetické soustavy a na výrobě špičkové energie. Instalovaný výkon elektrárny je 364 MW a celková hltnost všech turbín 600 m³/s. VN Kamýk vyrovnává špičkové přítoky z VE Orlík ve svém vyrovnávacím prostoru s celkovým objemem 4,65 mil. m³. Energetické využití obou vodních elektráren je tak omezeno kótami maximální a minimální hladiny vyrovnávacího prostoru VN Kamýk. Pokud nejsou uvažovány dynamické vlny vznikající v nádrži a VE Kamýk je odstavena, je zcela vyprázdňený vyrovnávací prostor nádrže teoreticky schopen pojmout maximální přítok z VE Orlík (600 m³/s) po dobu cca 2 hodin.

Popsání dynamických vln vznikajících v nádrži umožní optimalizovat výrobní režimy obou vodních elektráren tak, aby byl maximálně využit jejich hydroenergetický potenciál a zároveň nebyla překročena minimální nebo maximální hladina vyrovnávacího prostoru VN Kamýk.

V rámci diplomové práce je provedena řada simulací pro různé výrobní režimy vodních elektráren. Simulace jsou provedeny pomocí 1D hydraulického modelu nádrže Kamýk sestaveného v programu HEC-RAS. Na základě výsledků těchto simulací jsou sestaveny matematické funkce, které popisují průběh kladných a záporných amplitud dynamických vln způsobených provozem VE Orlík a VE Kamýk.

Cíle stanovené pro diplomovou práci jsou:

- identifikování vlastností dynamických vln v závislosti na provozních režimech VE Orlík a VE Kamýk,
- sestavení matematických funkcí popisující průběh kladných a záporných amplitud dynamických vln,

- posouzení možné přesnosti výpočtu velikosti a načasování amplitud a zhodnocení použitelnosti výpočtu v praxi.

Vyhodnocení stanovených cílů je realizováno v závěru diplomové práce.

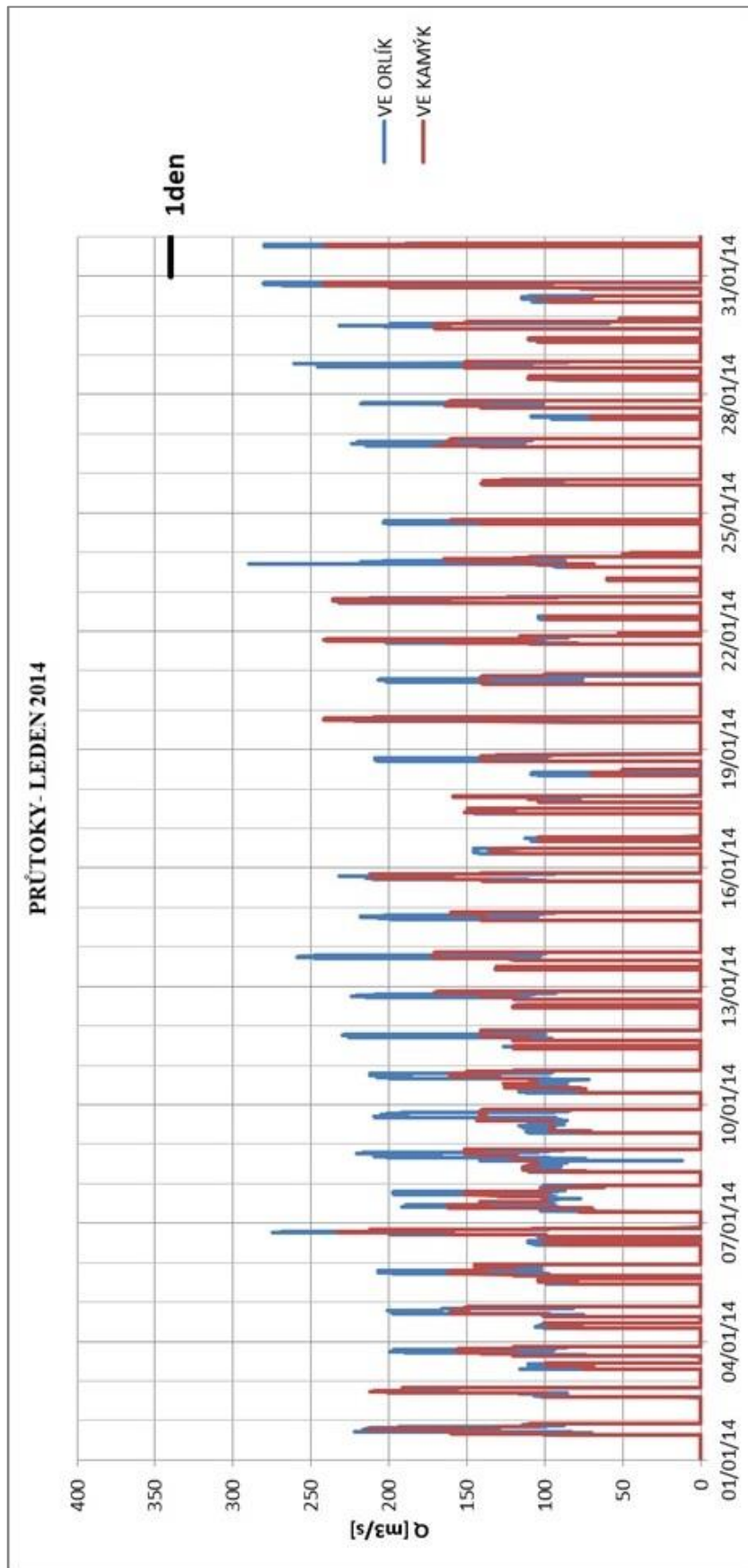
2 POUŽITÉ PODKLADY

2.1 Výrobní režimy VE Orlík a VE Kamýk

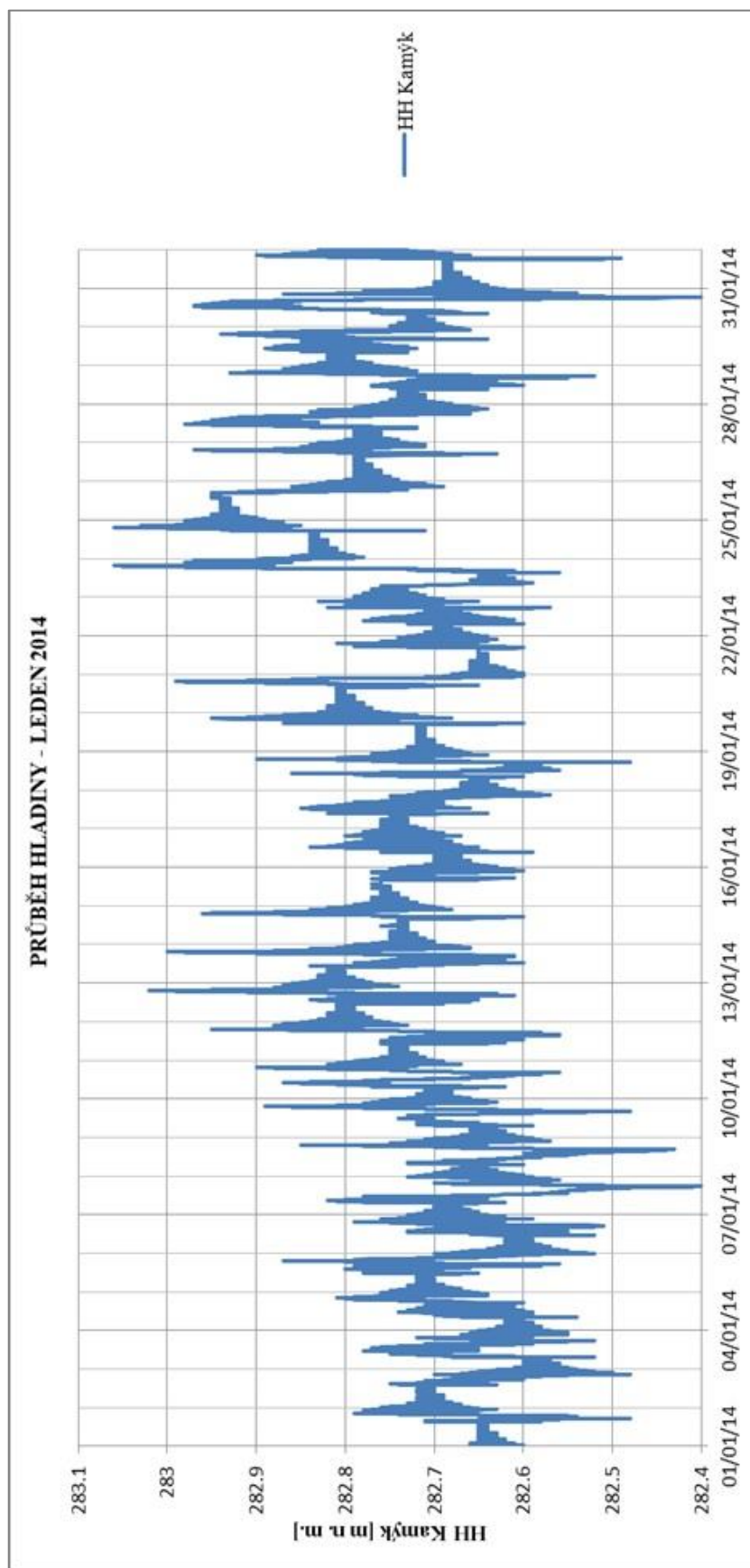
Podklady zahrnují výrobní režimy VE Orlík a VE Kamýk měřené v roce 2014, které jsou reprezentovány hodnotami celkového průtoku oběma elektrárnami v minutových krocích. Příklad takového záznamu za období jednoho měsíce je znázorněn v Grafu 2.1. Z tohoto podkladu je velmi dobře patrný špičkový provoz obou elektráren. Velmi často se objevuje výrobní režim, kdy je nejdříve v provozu VE Kamýk a část objemu vyrovnávacího prostoru je tak vyprázdněna pro následné přítoky z VE Orlík (Graf 2.2). Mnohdy je také VE Kamýk ponechána v provozu i po ukončení výroby na VE Orlík, aby část objemu vody, který přitekla z VE Orlík, byl z nádrže vypuštěn. Z Grafu 2.2 dále vyplývá, že výrobní režim jedné elektrárny je v průběhu 1 hodiny přibližně konstantní.

Součástí podkladů jsou dále měřené úrovně horní hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk) v minutových krocích za stejné období. Příklad takového záznamu je znázorněn v Grafu 2.3. V Grafu 2.4 je potom záznam měření hladiny zobrazen ve větším detailu a jsou zde patrné dynamické vlny, které vznikají v nádrži vlivem provozu vodních elektráren. Data o výrobních režimech a měření hladiny byla poskytnuta provozovatelem vodních elektráren, společností ČEZ, a.s

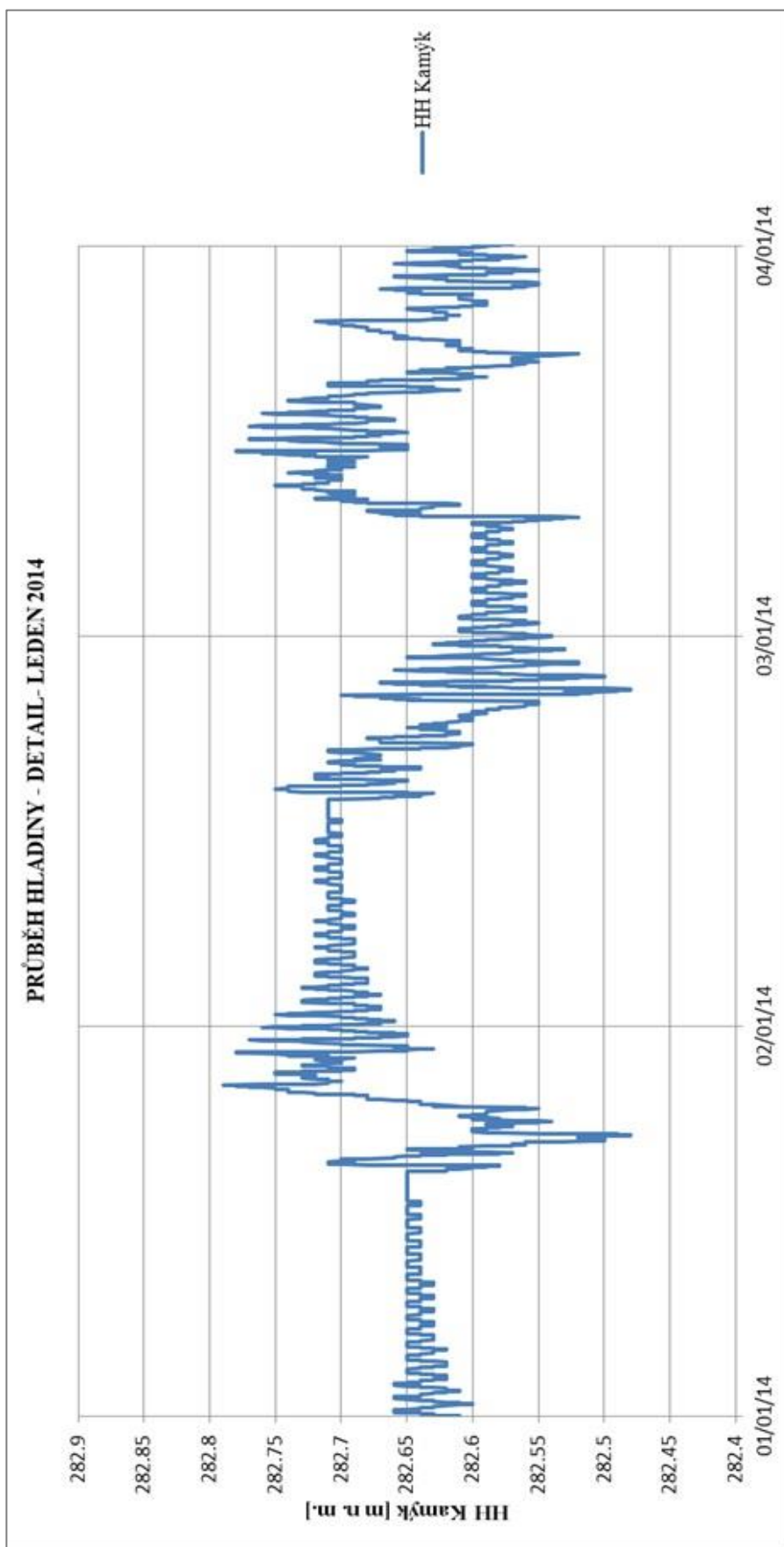
Graf 2.1 Výrobní režimy VE Orlik a VE Kamýk - leden 2014



Graf 2.3 Průběh hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk) - leden 2014



Graf 2.4 Průběh hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk) - detail



2.2 Matematický 1D model VN Kamýk

K simulaci výrobních režimů VE Orlík a VE Kamýk je využit existující matematický 1D model sestavený v roce 2009 pro potřeby projektu zadaného ŘVC ČR (1). Dle (1) byla geometrie VN Kamýk zajištěna na základě těchto zdrojů:

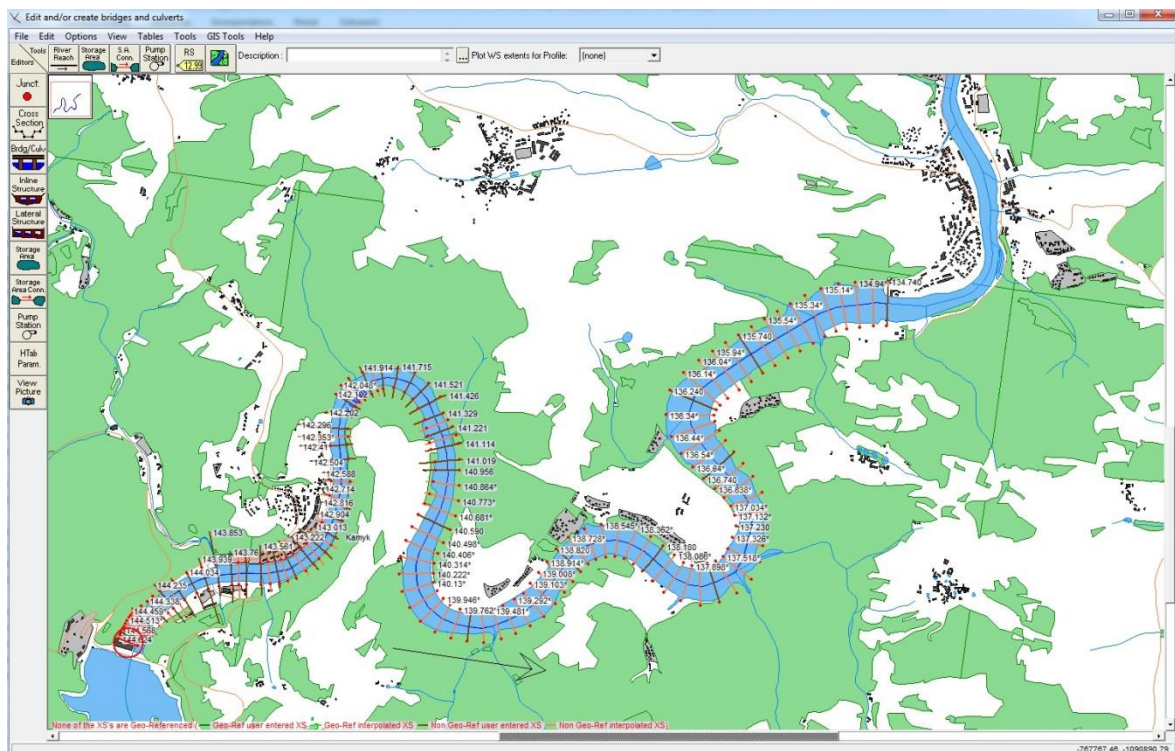
- Technicko-provozní evidence vodního toku Vltava ř. km 127,0 – 134,74; 141,0 – 144,65

Materiál byl zpracován v roce 2008 pro Povodí Vltavy, státní podnik. Průměrná vzdálenost příčných řezů je cca 100 m. Příčné řezy, které jsou použity z tohoto podkladu pro sestavení modelu, popisují přibližně první třetinu VN Kamýk pod hrází VD Orlík. (1)

- Podélný profil Vltavy a Otavy, úsek Vltava: Kamýk – Orlík, údolní řezy

Materiál byl zpracován v roce 1972 pro Povodí Vltavy. Průměrná vzdálenost příčných řezů je cca 500m. (1)

Z důvodu zajištění lepší stability výpočtu proudění je hustota příčných řezů zvětšena pomocí interpolace známých řezů. Interpolace je provedena tak, že na prvních cca 180 m je vzdálenost řezů přibližně 20 m a ve zbytku nádrže 50 až 100 m. Konečná poloha výpočetních příčných řezů je patrná z Obr. 2.1. Celková délka modelu je 9,844 km. (1)



Obr. 2.1 Výpočetní řezy v matematickém modelu (hnědá: zadané, oranžová: interpolované)

Hodnota Manningova součinitele drsnosti je stanovena kalibrací sestaveného modelu konstantní hodnotou $n=0,029$ po celé délce nádrže a v celé šířce příčných řezů. (1)

2.3 Technické podklady

Technické podklady zahrnují informaci o rozdělení celkového prostoru nádrže Kamýk na prostor stálého nadržení a vyrovnávací prostor (Tab. 2.1). Z Tab. 2.1 je patrné, že režim výroby elektrické energie na VE Orlík a VE Kamýk musí být nastaven tak, aby hladina ve VN Kamýk neklesla pod kótu 282,10 m n. m. (minimální kóta vyrovnávacího prostoru) a nestoupla nad kótu 284,60 m n. m (maximální kóta vyrovnávacího prostoru). Manipulační prostor má tak výšku 2,5 m.

Tab. 2.1 Rozdělení prostoru nádrže Kamýk (2)

PROSTOR STÁLÉHO NADRŽENÍ		
v rozmezí kót	270.10 až 282.10	m n. m.
objem	8.324	mil. m ³
zatopená plocha	174.2	ha
VYROVNÁVACÍ PROSTOR NÁDRŽE		
v rozmezí kót	282.10 až 284.60	m n. m.
objem	4.652	mil. m ³
zatopená plocha	195	ha
CELKOVÝ PROSTOR NÁDRŽE		
v rozmezí kót	270.10 až 284.60	m n. m.
objem	12.967	mil. m ³
zatopená plocha	195	ha

Technické podklady dále zahrnují informaci o počtu a hltnosti turbín na VE Kamýk a VE Orlík. Na VE Orlík jsou instalované čtyři turbíny, každá má hltnost 150 m³/s. Na VE Kamýk jsou také instalované čtyři turbíny, každá s hltností 90 m³/s. (3) (4)

3 METODIKA ŘEŠENÍ

Postup zpracování lze rozdělit do následujících bodů:

- kalibrace a validace stávajícího matematického modelu (pomocí dat z kapitoly 2.1),
- matematický výpočet průběhu dynamických vln v závislosti na výrobním režimu VE Orlík a VE Kamýk (provedeno pomocí SW HEC-RAS),
- získání informací o vlastnostech dynamických vln v závislosti na výrobních režimech VE Kamýk a VE Orlík,
- sestavení bilanční rovnice stanovující konečnou teoretickou ustálenou hladinu v závislosti na přítoku do nádrže, respektive odtoku z nádrže, a počáteční hladině v nádrži,
- sestavení matematických funkcí charakterizujících průběh kladných, respektive záporných, amplitud v profilu VD Kamýk v závislosti na výrobních režimech VE Orlík a VE Kamýk, vyčíslení jejich koeficientů a definování jejich proměnných,
- provedení kontrolních výpočtů průběhu amplitud pro kontrolní epizody a jejich porovnání s průběhem amplitud daným výstupem z matematického modelu nebo měřenými daty,
- diskuze o možnostech navazujícího výzkumu zahrnující téma způsobu ukončení provozu vodních elektráren.

3.1 Matematický výpočet neustáleného proudění

Výpočet neustáleného proudění je proveden aplikací Saint Venantových rovnic. Saint Venantovy rovnice vycházejí z obecnějších Naviere-Stokesových rovnic, které popisují 3D proudění vazké stlačitelné i nestlačitelné tekutiny. Naviere-Stokesovy rovnice jsou aplikací základních fyzikálních zákonů platných při proudění kapaliny (zákona zachování hmotnosti, zákona zachování síly a zákona zachování hybnosti). Při výpočtu neustáleného proudění v otevřených korytech lze zavést zjednodušující předpoklady, a tak ze složitějšího modelu vycházejícího z Naviere-Stokesových rovnic vytvořit model jednodušší, který je založený na rovnicích Saint Venantových. Zmíněné zjednodušení zahrnuje následující předpoklady:

- uvažujeme nestlačitelné nevazké prostředí (hustota kapaliny je konstantní, mezi jednotlivými částicemi nepůsobí třecí síly),

- uvažujeme 1D proudění – uvažujeme pouze horizontální složku rychlosti konstantní po celé ploše příčného řezu, vertikální a příčná složka rychlosti je zanedbána,
- vertikální složka zrychlení je zanedbána, a proto svislé rozložení tlaku je hydrostatické,
- podélný sklon dna je malý, a proto hloubka měřená svisle je rovna hloubce měřené kolmo na dno,
- geometrie koryta je konstantní.

Saint Venantovy rovnice jsou potom systémem dvou parciálních diferenciálních rovnic (rovnice kontinuity a pohybová rovnice) pro dvě neznámé $A(x, t)$ a $Q(x, t)$. Obě rovnice jsou bilancí hmotnosti, respektive sil, v kontrolním úseku toku, který je ohraničen vstupním a výstupním příčným řezem. Pro řešení Saint Venantových rovnic je nutné zadat počáteční podmínku a dvě okrajové podmínky. (5) (6) (7)

3.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je aplikací zákona zachování hmotnosti a je zadána ve tvaru:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

kde: $\frac{\partial Q}{\partial x}$ reprezentuje konvektivní změnu hmotnosti, tedy změnu danou rozdílem přitékající a odtékající hmotnosti do, respektive z, kontrolního úseku toku, $\frac{\partial A}{\partial t}$ reprezentuje lokální změnu, tedy změnu danou příbytkem nebo úbytkem hmotnosti v kontrolním úseku.

Dle zákona zachování hmotnosti musí být obě změny stejně velké a s opačným znaménkem, jejich součet tak musí být roven nule. (6) (7)

3.1.2 Pohybová rovnice

Pohybová rovnice je aplikací zákona zachování hybnosti a bilancuje síly působící na kontrolní úsek toku (síly tíhy, tření, tlaku a setrvačnosti). Zákon zachování hybnosti říká, že změna hybnosti kapaliny uvnitř kontrolního úseku je rovna součtu vnějších sil, které na kontrolní úsek působí, a je vyjádřen ve tvaru:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Qv) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0, \quad (2)$$

kde: $\frac{\partial Q}{\partial t}$ reprezentuje změnu hybnosti uvnitř kontrolního úseku,

$\frac{\partial}{\partial x}(Qv)$ reprezentuje rozdíl hybnosti předané na konci a začátku kontrolního úseku,

$gA \frac{\partial y}{\partial x}$ reprezentuje rozdíl tlakových sil na vstupním a výstupním profilu kontrolního úseku,

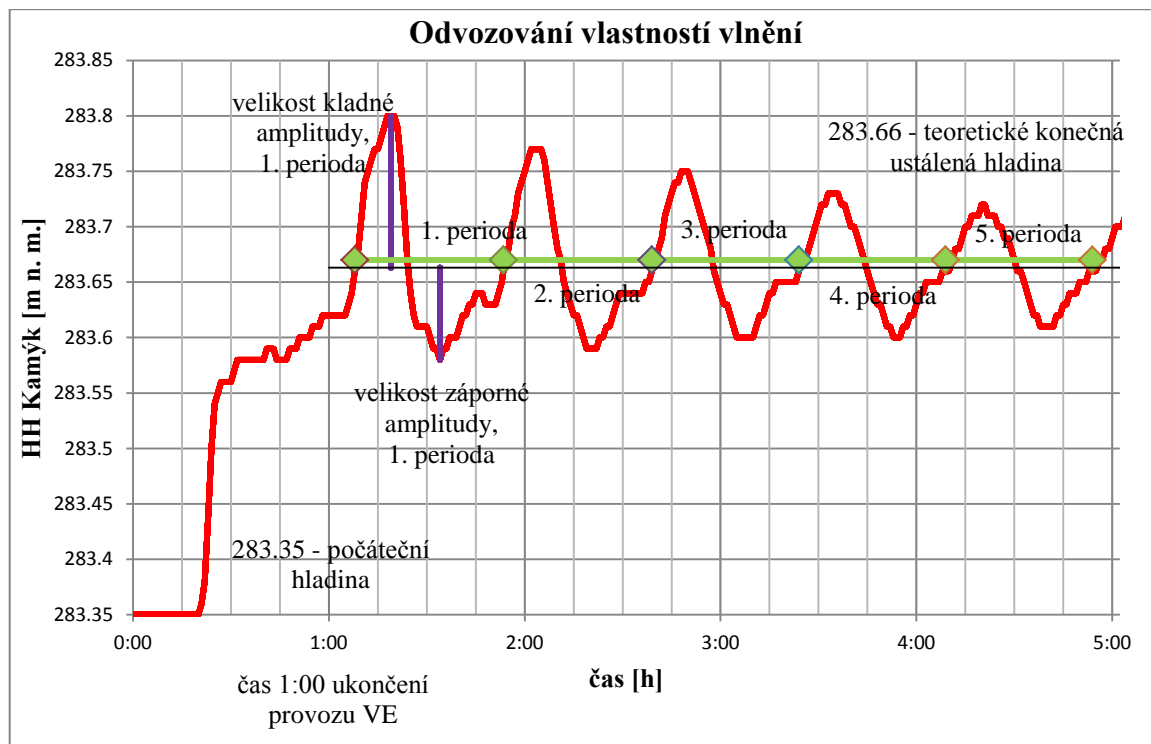
gAS_f reprezentuje třecí sílu mezi kapalinou a dnem toku, kde S_f je sklon čáry energie mezi vstupním a výstupní profilem,

gAS_0 reprezentuje tíhovou sílu, kde S_0 je sklon dna mezi vstupním a výstupním profilem. (6) (7)

3.2 Metodika odečtení vlastností dynamických vln

Z výstupu z matematického modelu (průběh vlnění v profilu VD Kamýk v čase) pro různé výrobní režimy vodních elektráren jsou odečteny velikosti kladných a záporných amplitud v 1. až 5. periodě, délky 1. až 5. periody a rozdíly konečných a výchozích hladin. Příklad výstupu z matematického modelu je znázorněn v Grafu 3.1, kde červená linka znázorňuje průběh hladiny v profilu VD Kamýk v závislosti na čase.

Graf 3.1 Odvození vlastností vlnění v závislosti na výrobním režimu VE



3.3 Bilanční rovnice pro stanovení konečné ustálené hladiny

Bilanční rovnice pro stanovení konečné ustálené hladiny v nádrži popisuje chování hladiny v nádrži, respektive v profilu VD Kamýk, bez vznikých vln a je odvozena na základě získaných rozdílů počátečních a konečných hladin, které vycházejí z provedených simulací pro různé výrobní režimy vodních elektráren (kapitola 3.2). Rovnice vyjadřuje závislost nárůstu, respektive poklesu, ustálené hladiny v nádrži na výrobních režimech VE Orlík a VE Kamýk. Rovnice je vyjádřena ve tvaru:

$$\Delta h = A_{OR} \cdot Q_{OR} + A_{KA} \cdot Q_{KA} \quad (3)$$

kde: Δh je rozdíl konečné teoretické ustálené hladiny a počáteční hladiny,

$A_{OR/KA}$ je koeficient rovnice pro provoz VE Orlík (OR), respektive VE Kamýk (KA),

$Q_{OR/KA}$ je průtok VE Orlík (OR), respektive VE Kamýk (KA).

Rovnice je aplikovaná jako nárůst, respektive snížení, teoretické ustálené hladiny v daném výpočetním kroku od stavu v předcházejícím výpočetním kroku na základě výrobních režimů v daném výpočetním kroku. Délka výpočetního kroku je 1 minuta. Koeficient A_{OR} reprezentuje míru nárůstu hladiny v nádrži v závislosti na průtoku VE Orlík a koeficient A_{KA} reprezentuje míru poklesu hladiny v nádrži v závislosti na průtoku VE Kamýk.

3.4 Tvar matematické funkce pro průběh amplitud

Pro potřeby výpočtu jsou na základě znalosti vlastností dynamických vln (kapitola 3.2) sestaveny čtyři rovnice (A-D), které jsou vyjádřeny ve stejné podobě, ale hodnoty jejich koeficientů a proměnných se liší. Tento přístup předpokládá, že v konečné fázi je jednotlivě vyčíslen příspěvek provozu VE Orlík a VE Kamýk na průběh záporných a kladných amplitud a tyto jednotlivé příspěvky jsou poté sečteny. Rovnice A vyjadřuje vliv provozu VE Orlík na průběh kladných amplitud a rovnice B vyjadřuje vliv provozu VE Orlík na průběh amplitud záporných. Rovnice C a D vyjadřují totéž, ale pro případ provozu VE Kamýk. Konečný průběh kladných amplitud je tak tvořen součtem výsledků rovnic A a C a konečný průběh záporných amplitud součtem výsledků rovnic B a D. Všechny rovnice jsou vyjádřeny v následující podobě:

$$A = A_0 + A_1 Q e^{-b(t+t_0)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi \frac{2\pi}{T}\right), \quad (4)$$

kde: A je velikost amplitudy (vztaženo k teoretické ustálené hladině),

$A_0, A_1, -b$ jsou konstanty rovnice,

t vyjadřuje čas, $t=0$ je okamžik vypnutí VE,

Q je průtok danou VE,

t_0 vyjadřuje vliv zpoždění informace o vypnutí VE (relevantní pro VE Orlík¹),

T je perioda dynamických vln,

φ je fázový posun vlny od nulového bodu, který je definován časem $t=0$.

Cílem optimalizace koeficientů rovnic není dokonalé popsání průběhu vlnění jako celku, ale co nejlepší popsání načasování a velikosti jednotlivých amplitud jako krajních (tedy nejméně příznivých) stavů dynamické vlny v 1. až 5. periodě.

Velikost amplitudy v každém výpočetním kroku je přičtena (kladná amplituda), respektive odečtena (záporná amplituda), k vypočtené teoretické ustálené hladině v tomtéž výpočetním kroku (kapitola 3.3). Délka výpočetního kroku je, stejně jako pro stanovení ustálené hladiny (kapitola 3.3), 1 minuta.

¹ Čas $t=0$ je stanoven stejně pro rovnice popisující vliv provozu VE Orlík i VE Kamýk na okamžik vypnutí. V případě provozu VE Orlík se ovšem vliv vypnutí neprojeví na měřené hladině v profilu VD Kamýk okamžitě, ale s jistým zpožděním, které je popsáno členem t_0 .

4 POUŽITÝ SOFTWARE

4.1 HEC-RAS (verze 4.1.0)

Pro matematický výpočet proudění je použit program HEC-RAS (verze 4.1.0).

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis systém) je software vyvíjený U. S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources. Program umožňuje simulovat 1D proudění v sítích koryt, včetně příčných a podélných objektů na toku. Software obsahuje čtyři typy výpočtu: režim ustáleného proudění, režim neustáleného proudění, transport sedimentu a analýzu kvality vody. HEC-RAS je volně dostupný software a je k dispozici na stránkách U. S. Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>). (8)

Pro potřeby diplomového práce je v programu HEC-RAS využit výpočet neustáleného 1D proudění. Hydraulické výpočty jsou provedeny aplikací Saint Venantových rovnic, které byly odvozeny v kapitole 3.1. (8)

4.2 SW Microsoft Office Excel – Řešitel

Optimalizace parametru A_0 , A_1 , $-b$ (kapitola 3.4) je provedena pomocí funkce „Řešitel“, která je součástí SW Microsoft Office Excel (verze 2010). Tato funkce optimalizuje proměnné buňky tak, aby minimalizovala hodnotu buňky cíle, která je ovlivněna hodnotami buněk proměnných. Řešitel obsahuje tři různé metody řešení: GRG Nonlinear Method (pro řešení hladce nelineárních problémů), LP Simplex Method (pro řešení lineárních problémů) a Evolutionary Method (pro řešení jiných než hladkých problémů). Pro potřeby diplomové práce je využita GRG Nonlinear Method. (9)

5 POPIS LOKALITY

5.1 VD Kamýk

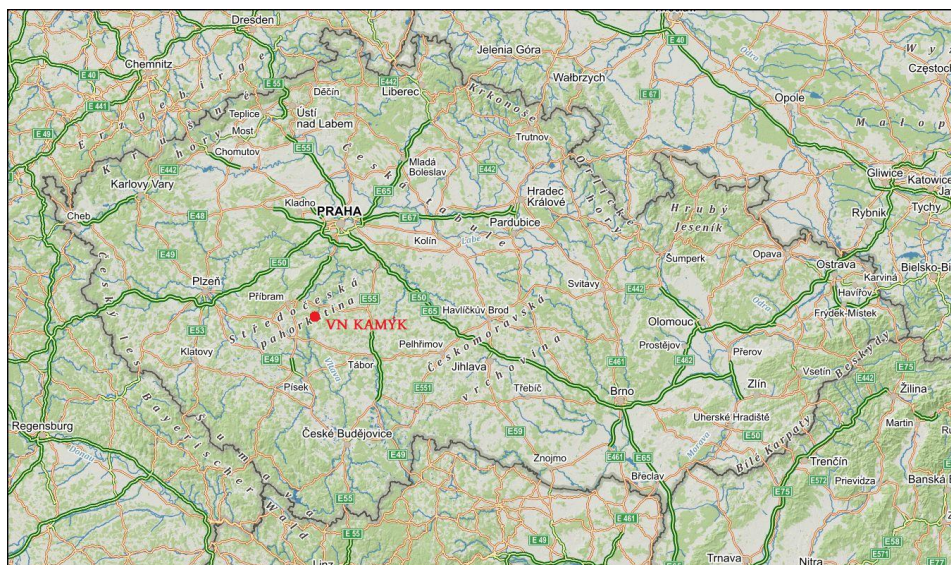
VD Kamýk leží na vodním toku Vltava v říčním kilometru 134,73, na konci vzdutí Slapského jezera nad obcí Kamýk nad Vltavou. Územně se nachází ve Středočeském kraji v katastrálním území Kamýk nad Vltavou a je součástí Vltavské kaskády (Obr. 5.1). VD Kamýk bylo postaveno mezi lety 1957 až 1961. Do plného provozu bylo dílo uvedeno, stejně jako VD Orlický, v roce 1966. Hlavním účelem přehrady je vyrovnávání špičkových průtoků z elektrárny Orlický, využití spádu pro výrobu elektrické energie a odebírání pitné a průmyslové vody. (4) (10)

Přehradní nádrž má rozlohu 195 ha a celkový objem 12,98 mil. m³. Délka přehradního jezera je 9,92 km. V současné době je nádrž plněna téměř výhradně provozem VE Orlický. Rozdělení prostoru nádrže je zaznamenáno v Tab. 2.1. (4) (10)

Přehradní těleso je přímá, tížná, betonová hráz o celkové délce 158 m. Výška hráze nad základovou spárou je 24,5 m a výška hráze nade dnem je 17 m. Bezpečnostní přeliv má čtyři pole, každé o délce 18 m, která jsou hrazena segmentovými uzávěry. Maximální kapacita přelivu je 2035 m³/s. (4) (10)

Vodní elektrárna je situována na levém břehu a je osazena čtyřmi Kaplanovými turbínami. Instalovaný výkon elektrárny je 40 MW a hltnost je 4 x 90 m³/s. (4) (10)

Na pravém břehu je umístěna plavební komora pro přepravu plavidel do 300 t. Délka plavební komory je 35 m a šířka 6,5 m. (4) (10)



Obr. 5.1 Lokalizace VN Kamýk na území ČR (11)

5.2 VD Orlík

VD Orlík leží na vodním toku Vltava v říčním kilometru 144,65 na konci vzdutí Kamýckého jezera. Územně se nachází ve Středočeském kraji v katastrálním území Orlické Zlákovice a Zbenické Zlákovice a je součástí Vltavské kaskády. Stavba přehrady začala v roce 1957 a v roce 1960 bylo zahájeno napouštění nádrže. Plný provoz byl spuštěn v roce 1966. Hlavním účelem vodního díla jsou akumulace vody pro nadlepšování průtoků na spodní části Vltavy a Labe, částečná ochrana před povodněmi a výroba elektrické energie. Další využití nádrže zahrnuje rekreaci, vodní sporty, rybářství a vodní plavbu. (3) (12)

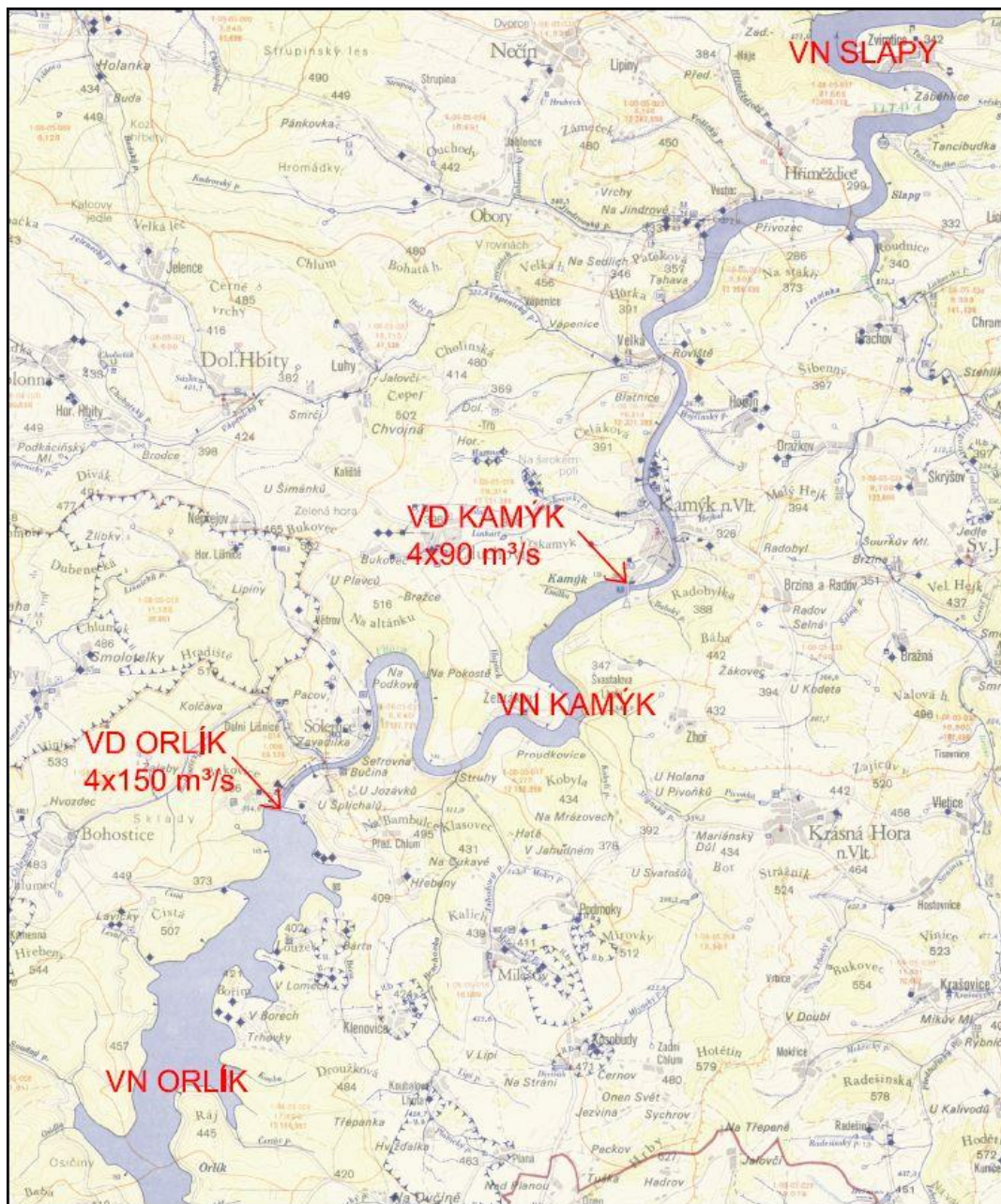
Přehradní těleso tvoří přímá, tížná, betonová hráz. Délka v koruně je 450 m. Výška hráze nade dnem je 81,50 m. Bezpečnostní přeliv tvoří tři pole, každé o délce 15 m. Všechna pole jsou hrazena segmentovým uzávěrem. Maximální kapacita přelivu je 2183 m³/s. Pod přelivem jsou umístěny dvě spodní výpusti s maximální kapacitou 371 m³/s. (3) (12)

Na levém břehu je umístěna vodní elektrárna, která je osazena čtyřmi Kaplanovými turbínami. Instalovaný výkon elektrárny je 364 MW a hltnost je 4 x 150 m³/s. (3) (12)

Na pravém břehu je umístěno plavební zařízení pro malá sportovní plavidla. Plavební zařízení pro přepravu plavidel do 300 t je řešeno jako šikmé lodní zdvihadlo, avšak dokončena je pouze jeho stavební část. (3) (12)

Přehradní nádrž má celkový objem 716,5 mil. m³. Zatopená plocha jezera zaujímá rozlohu 2 732,7 ha. Délka vzniklého jezera je 68 km. (3) (12)

Prostorové uspořádání VE Orlík a VE Kamýk je znázorněno na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Prostorové uspořádání VE Orlík a VE Kamýk (13)

6 VÝPOČET PRŮBĚHU VLN V HEC-RAS (MODELOVÁNÍ)

6.1 Vstupní data

Pro výpočet neustáleného proudění v SW HEC-RAS je potřeba vložit geometrická data, okrajové podmínky a počáteční podmínku.

6.1.1 Geometrická data

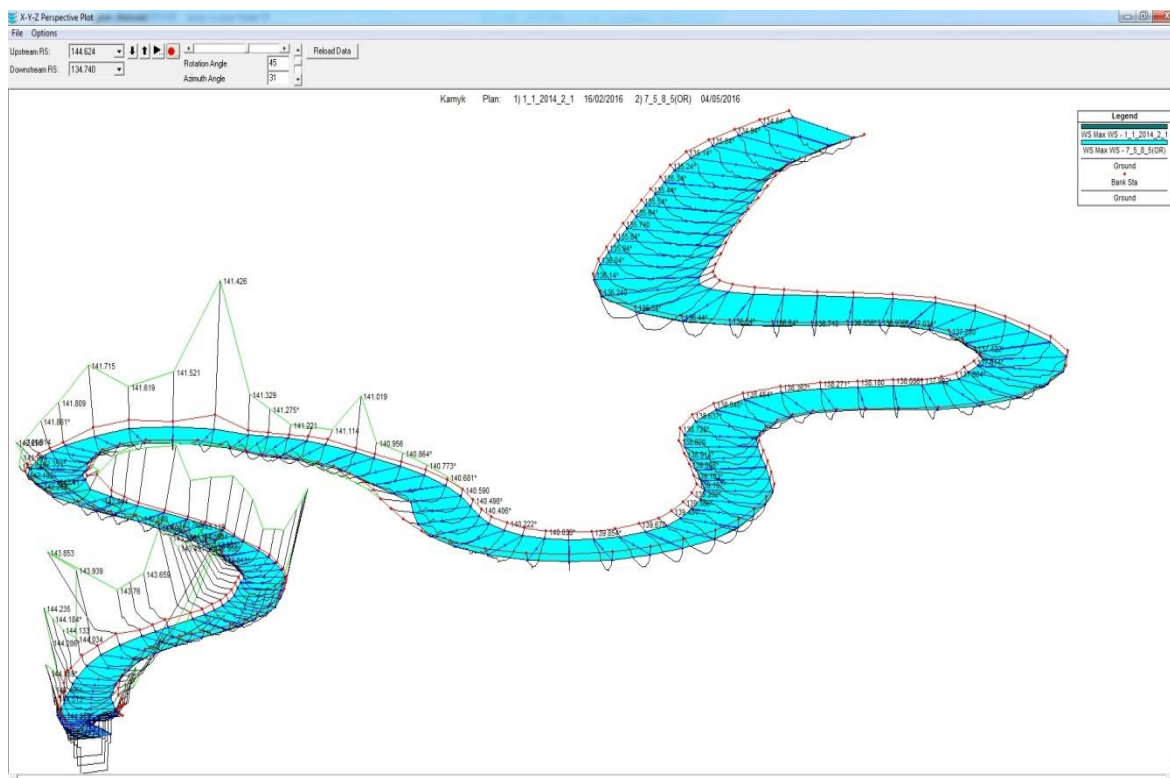
Geometrická data zahrnují geometrii koryta (příčné řezy) a Manningův součinitel pro jednotlivé příčné řezy. Veškerá geometrická data jsou převzata z existujícího matematického modelu (kapitola 2.2). Schematizace VN Kamýk ve výpočetním programu je znázorněna na Obr. 6.1.

6.1.2 Okrajové podmínky

Pro veškeré výpočty jsou okrajové podmínky zadány ve formě průtokových hydrogramů v prvním (profil VD Orlík) a posledním (profil VD Kamýk) příčném řezu. Data v jednotlivých hydrogramech se liší dle modelované epizody.

6.1.3 Počáteční podmínka

Počáteční podmínka je zadána jako výchozí hladina ve VN Kamýk a je uvažována stejná po celé délce nádrže. Hodnota počáteční podmínky závisí na modelované epizodě.



Obr. 6.1 Schematizace VN Kamýk v HEC-RAS

6.2 Kalibrace modelu

Kalibrace modelu je provedena na základě porovnání měřeného průběhu hladiny v profilu VD Kamýk při vybrané epizodě zadané výrobními režimy VE Orlík a VE Kamýk a průběhu hladiny v tomtéž profilu zpracované výpočetním programem. Kalibrační epizoda je vybrána z dat poskytnutých provozovatelem vodních elektráren (kapitola 2.1). Při vybrané kalibrační epizodě je v provozu pouze VE Orlík (nulový průtok VE Kamýk). Tento postup je zvolen proto, aby byly snáze identifikovatelné případné nepřesnosti v sestaveném modelu a aby mohlo být provedeno jejich odstranění. Vybraná kalibrační epizoda začíná v 7:00 28.2.2014 a končí v 11:55 téhož dne.

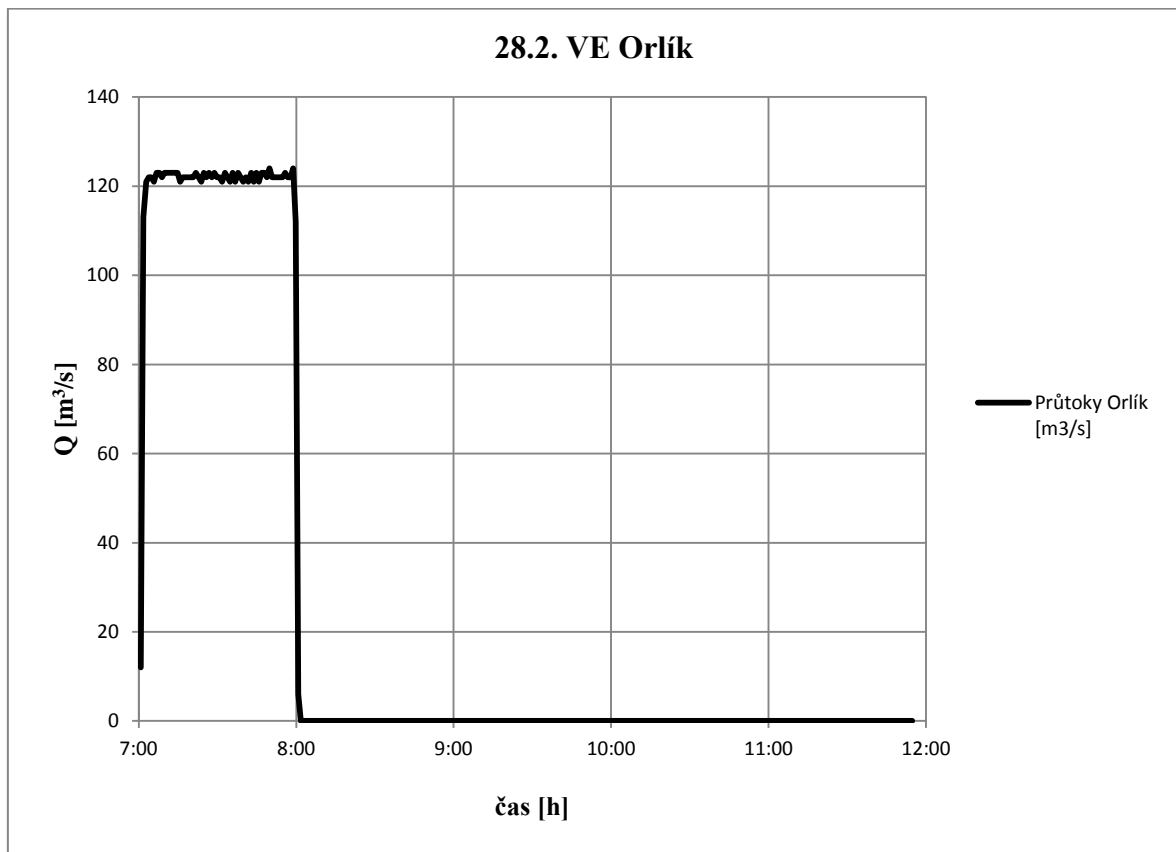
Zaznamenané průtoky VE Orlík (Graf 6.1) vyjmuté z měřených dat (kapitola 2.1) jsou do výpočtu vloženy jako horní okrajová podmínka. Dolní okrajová podmínka je zadána nulovými průtoky v celé délce trvání modelované epizody. Počáteční podmínka je zadána hodnotou výchozí hladiny v nádrži 282,62 m n. m. (měřená hladina v profilu VD Kamýk v čase 7:00), která je odečtena z měřených dat (kapitola 2.1).

Průběh hladiny v profilu hráze Kamýk (HH Kamýk) z měřených dat je zaznamenán v Grafu 6.2 černou linkou. Průběh téhož z výpočetního modelu před kalibrací je znázorněn v Grafu 6.2 červenou linkou. Rozdíl mezi modelovaným a měřeným průběhem je znázorněn jako delta v Grafu 6.2 fialovou linkou. Rozptyl delty je cca +0,1 m až -0,07 m. Z porovnání černé a červené linky vyplývá, že perioda modelovaných dynamických vln je kratší než perioda měřeného průběhu vlnění. Dále je patrné, že konečná ustálená hladina v nádrži by z výsledku modelu byla o cca 2-3 cm níže, než konečná ustálená hladina vyplývající z měření.

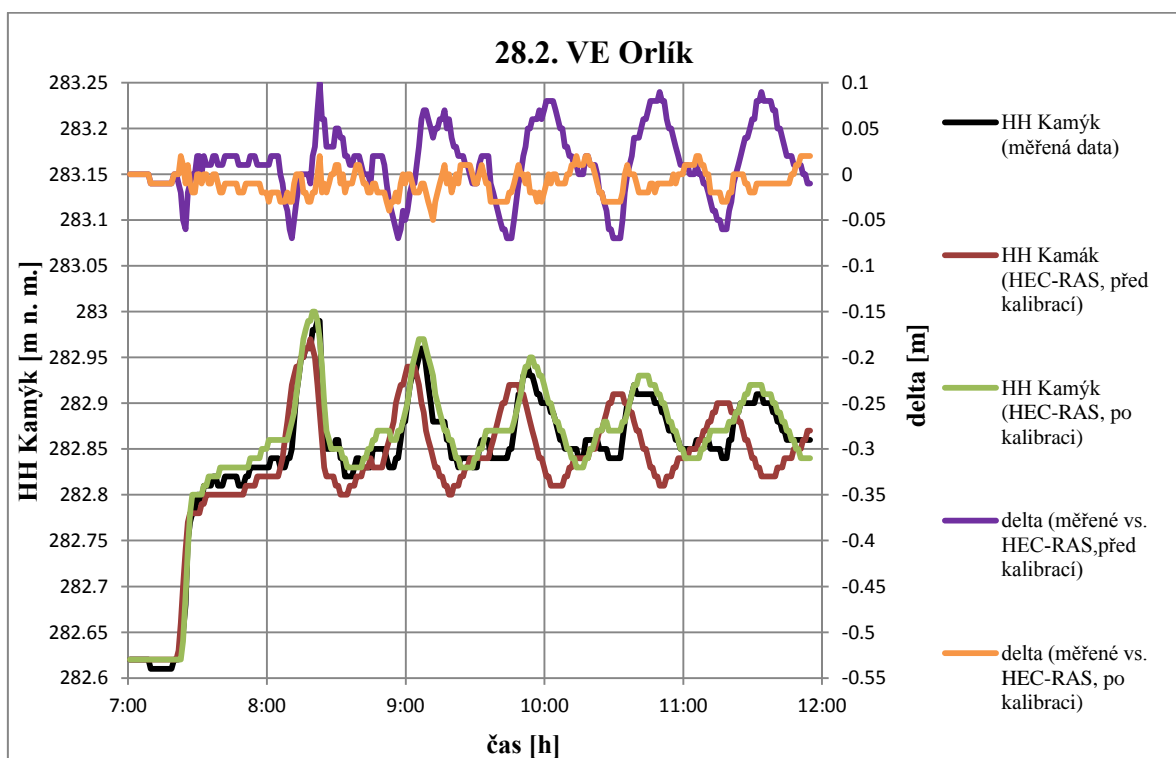
Možné prostředky pro kalibraci modelu zahrnují úpravu drsnosti koryta toku a úpravu geometrie koryta. Úprava drsnosti koryta se při testech prokázala jako nevhodný prostředek pro kalibrování modelu. Hodnota součinitele by musela být snížena přibližně na třetinu jeho původní hodnoty, aby bylo docíleno dostatečného zpomalení postupu dynamické vlny v nádrži a byla tak dosažena požadovaná frekvence vlnění. Za vhodnější prostředek je tak považována úprava geometrie koryta, tedy geometrie jednotlivých příčných řezů a vzdálenosti mezi nimi. Pro sjednocení frekvence vlnění z výstupu z modelu s frekvencí měřeného vlnění je nutné zvětšit délku mezi jednotlivými řezy, aby se tak zpomalil postup vlny v nádrži. Tento krok je ovšem kontraproduktivní k potřebě zajistit zvýšení konečné ustálené hladiny, neboť je zvětšen objem nádrže. Proto je přistoupeno ke zmenšení obsahů jednotlivých příčných řezů.

V konečné fázi jsou všechny vzdálenosti mezi jednotlivými řezy zvětšeny o 7 % a všechny plochy příčných řezů jsou zmenšeny o 15 %. Průběh hladiny v profilu hráze Kamýk z výpočetního modelu po kalibraci je znázorněn v Grafu 6.2 zelenou linkou. Rozdíl mezi modelovaným a měřeným průběhem je znázorněn jako delta v Grafu 6.2 oranžovou linkou. Rozptyl delty je cca +0,02 m až -0,05 m. Kalibrační model je rozkmit delty snížen o více než polovinu.

Graf 6.1 Kalibrační epizoda - průtoky VE Orlík



Graf 6.2 Kalibrační epizoda - průběhy hladiny HH Kamýk



6.3 Validace modelu

Validace modelu je provedena, stejně jako kalibrace, porovnáním měřeného průběhu hladiny v profilu VD Kamýk při vybrané epizodě zadané výrobními režimy VE Orlík a VE Kamýk a průběhu hladiny v tomtéž profilu zpracované výpočetním programem. Jsou testovány tři validační epizody.

Při první validační epizodě je v provozu pouze VE Orlík. Epizoda začíná 7. 5. 2014 ve 14:11 a končí ve 20:00 téhož dne. Horní okrajová podmínka je zadána vložением hodnot měřených průtoků VE Orlík (Graf 6.3) vyjmutých ze známých podkladů (kapitola 2.1). Dolní okrajová podmínka je zadána nulovými průtoky v celé délce trvání modelované epizody. Počáteční podmínka je zadána hodnotou výchozí hladiny v nádrži 282,76 m n. m. (měřená hladina v profilu VD Kamýk v čase 14:11), která je odečtena z měřených dat (kapitola 2.1). Průběh hladiny v profilu VD Kamýk z měřených dat je zaznamenán v Grafu 6.4 černou linkou. Průběh téhož z výpočetního modelu po kalibraci je znázorněn v Grafu 6.4 zelenou linkou. Rozdíl mezi modelovaným a měřeným průběhem je znázorněn jako delta v Grafu 6.4 oranžovou linkou. Rozptyl delty je cca +0,05 m až -0,03 m.

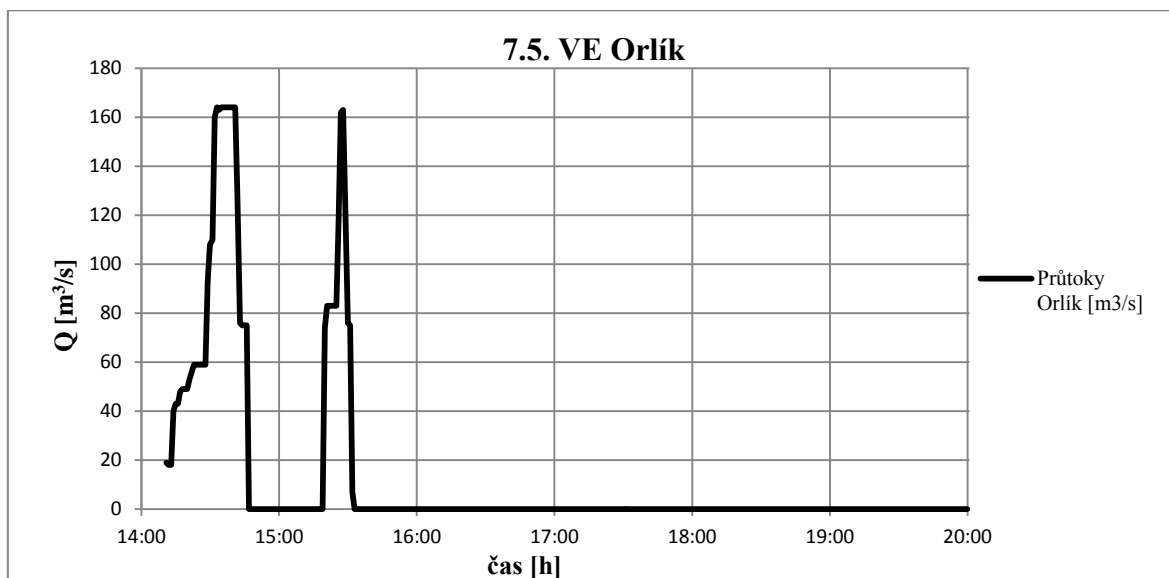
Při druhé validační epizodě je v provozu pouze VE Kamýk. Epizoda začíná 10. 12. 2014 v 15:59 a končí 11. 12 v 5:00. Horní okrajová podmínka je zadána nulovými průtoky v celé délce trvání modelované epizody. Dolní okrajová podmínka je zadána vložением hodnot měřených průtoků VE Kamýk (Graf 6.5) vyjmutých ze známých podkladů (kapitola 2.1). Počáteční podmínka je zadána hodnotou výchozí hladiny v nádrži 283,36 m n. m. (měřená hladina v profilu VD Kamýk v čase 15:59), která je odečtena z měřených dat (kapitola 2.1). Průběh hladiny v profilu VD Kamýk z měřených dat je zaznamenán v Grafu 6.6 černou linkou. Průběh téhož z výpočetního modelu po kalibraci je znázorněn v Grafu 6.6 zelenou linkou. Rozdíl mezi modelovaným a měřeným průběhem je znázorněn jako delta v Grafu 6.6 oranžovou linkou. Rozptyl delty je cca +0,03 m až 0,00 m.

Třetí validační epizoda testuje případ, kdy jsou v provozu obě vodní elektrárny. Epizoda začíná 7. 3. 2014 v 8:58 a končí 8. 3. 2014 v 5:00. Horní okrajová podmínka je zadána vložением měřených průtoků VE Orlík (Graf 6.7 – černá linka) a dolní okrajové podmínka vložением měřených průtoků VE Kamýk (Graf 6.7 – modrá linka). Obě řady průtoků jsou vyjmuty ze známých podkladů (kapitola 2.1). Počáteční podmínka je zadána hodnotou výchozí hladiny v nádrži 282,74 m n. m. (měřená hladina v profilu VD Kamýk v čase 8:58), která je odečtena z měřených dat (kapitola 2.1). Průběh hladiny v profilu VD

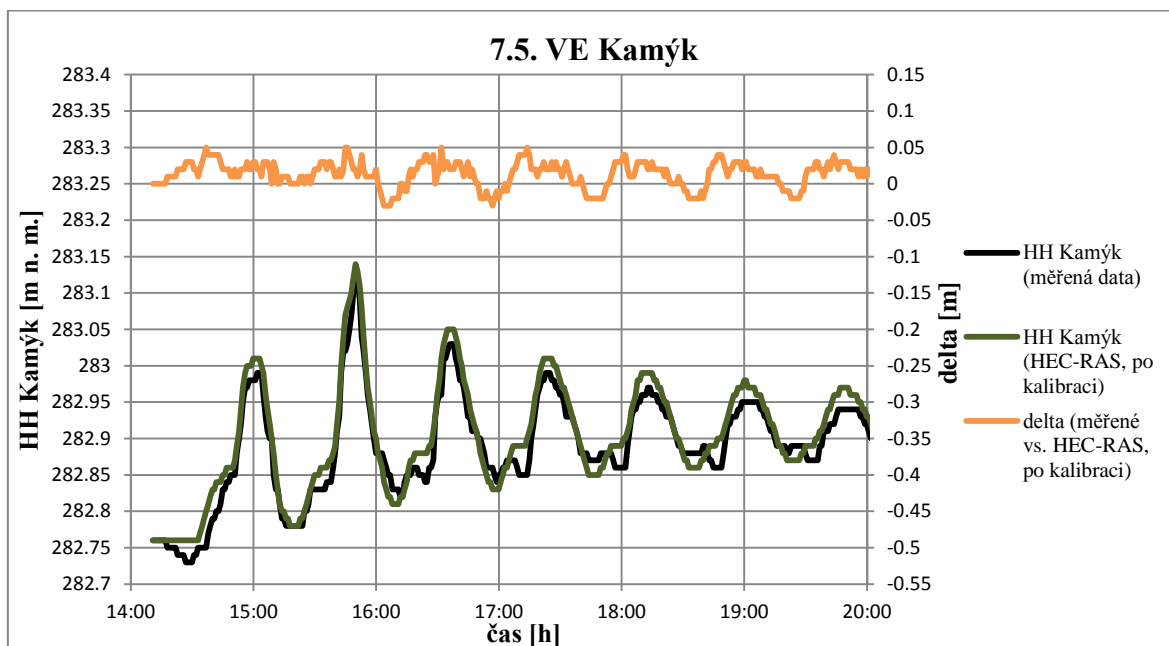
Kamýk z měřených dat je zaznamenán v Grafu 6.8 černou linkou. Průběh téhož z výpočetního modelu po kalibraci je znázorněn v Grafu 6.8 zelenou linkou. Rozdíl mezi modelovaným a měřeným průběhem je znázorněn jako delta v Grafu 6.8 oranžovou linkou. Rozptyl delty je cca +0,05 m až -0,05 m.

Rozdíly mezi měřenými daty a modelovanými výstupy (hodnoty delty) se ve validačních testech pohybují mezi +0,05 m a -0,05 m. Hodnoty delty se tak pohybují na hranici přesnosti měření hladiny a validace tak potvrzuje požadovanou přesnost kalibrace výpočetního modelu.

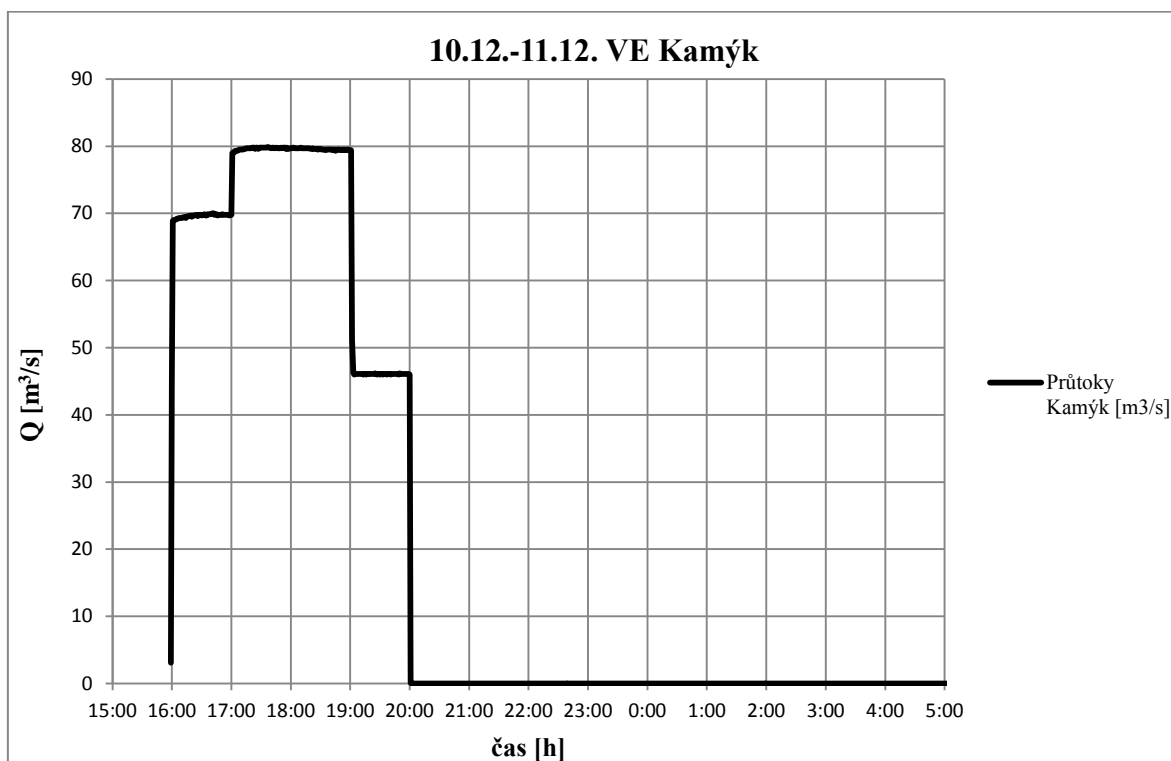
Graf 6.3 Validační epizoda 7.5.2014 - průtoky



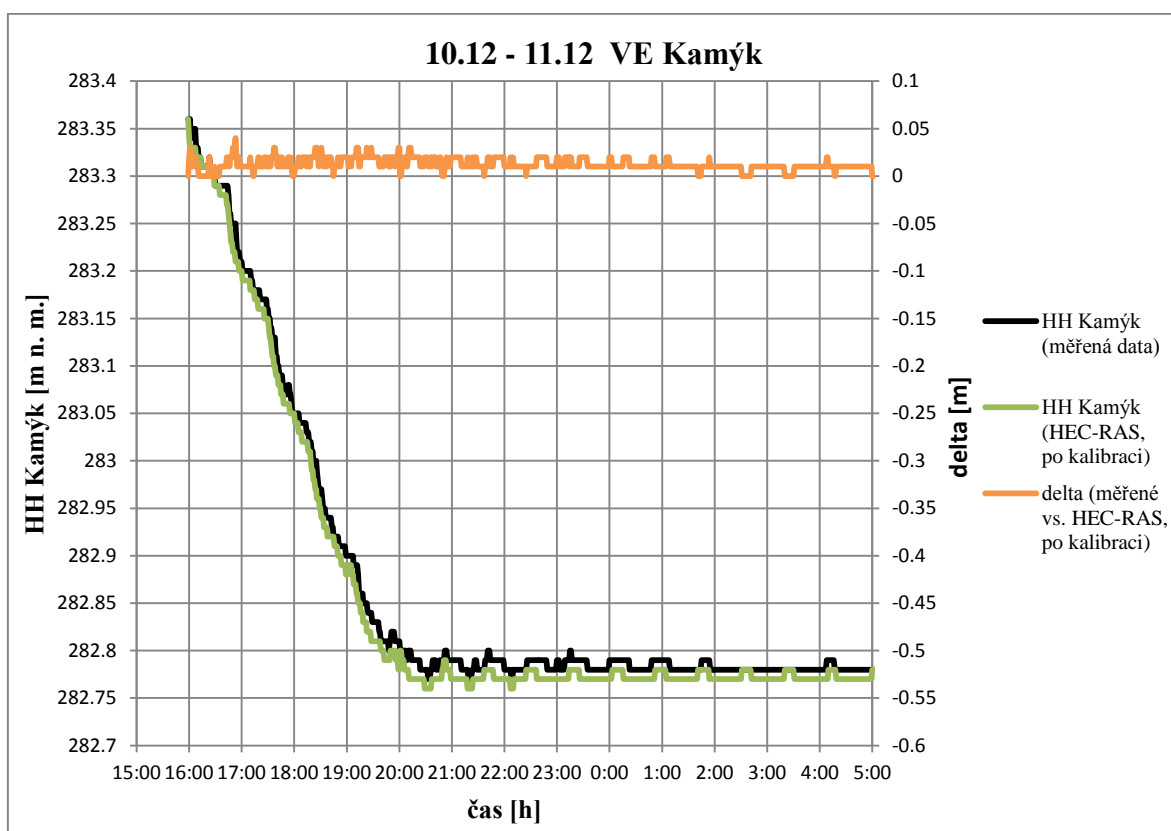
Graf 6.4 Validační epizoda 7.5.2014 – průběh hladiny



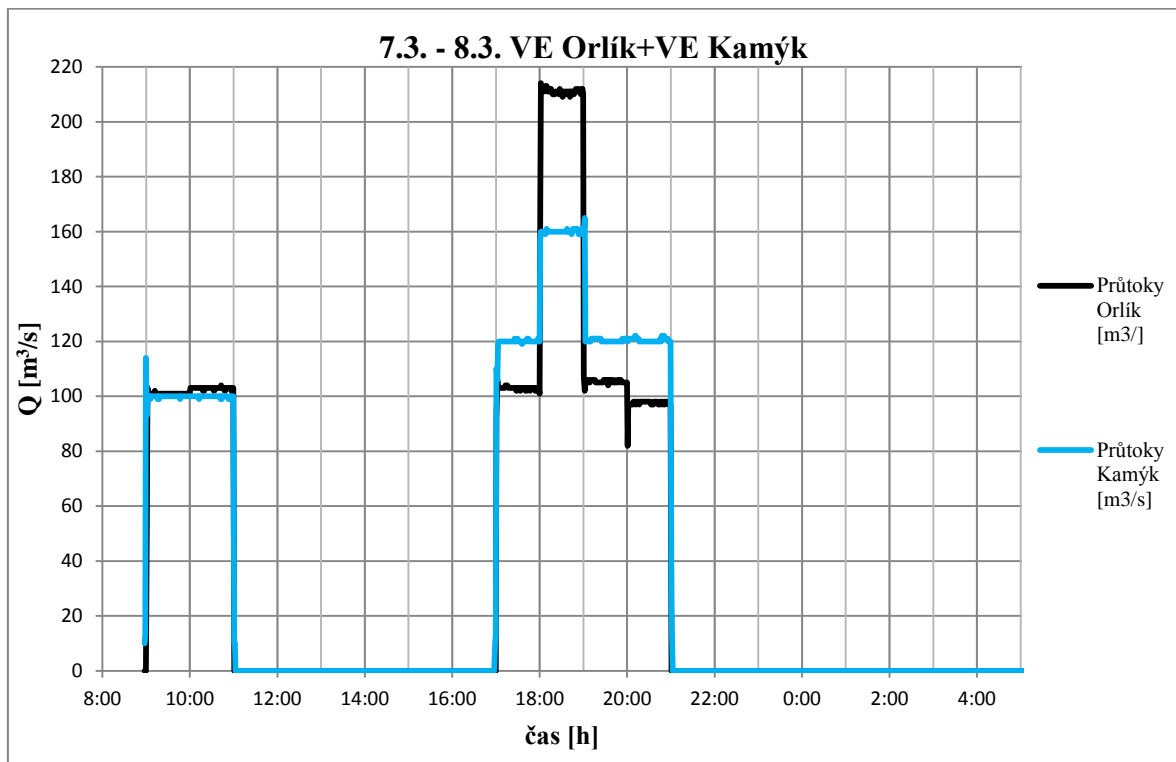
Graf 6.5 Validační epizoda 10.12. - 11.12. - průtoky



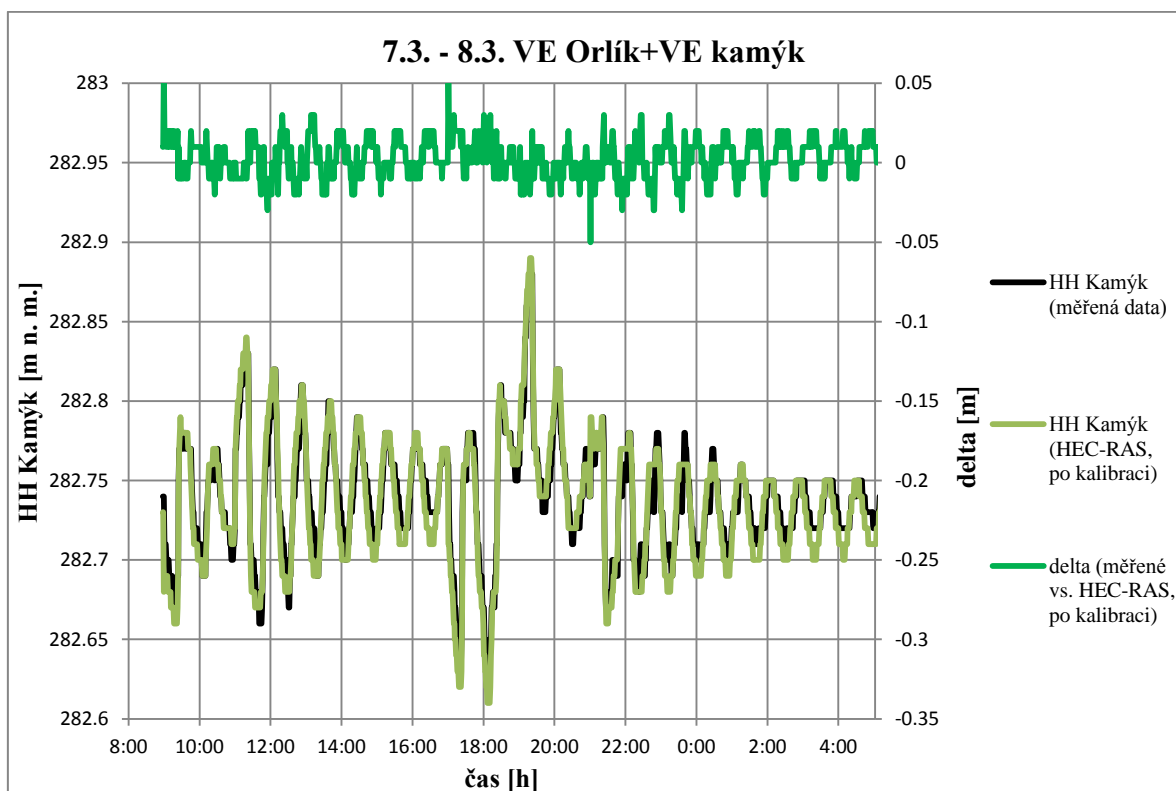
Graf 6.6 Validační epizoda 10.12. - 11.12. - průběh hladiny



Graf 6.7 Validační epizoda 7.3. - 8.3. - průtoky



Graf 6.8 Validační epizoda 7.3. - 8.3. - průběh hladiny



6.4 Vliv výchozí hladiny

Před započítáním simulací provozních režimů, na základě jejichž výsledků budou odvozeny vlastnosti dynamických vln v nádrži, je ověřen vliv výchozí hladiny v nádrži (hodnota počáteční podmínky) na vlastnosti vlnění. Pro stanovení vlivu výchozí hladiny je provedeno celkem 16 simulací. Při každé simulaci vyrábí pouze jedna vodní elektrárna (druhá okrajová podmínka je zadaná nulovými průtoky po celou dobu trvání simulace). Každá simulace začíná v čase 0:00 spuštěním provozu vodní elektrárny. Ukončení provozu elektrárny je v čase 1:00 a průtok je po celou dobu (1 hodina) konstantní. Průtok vodní elektrárnou odpovídá součtu hlností turbín, které jsou v provozu. Pokud je v provozu jedna turbína (1TG) na VE Orlík, je průtok roven $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (kapitola 2.3). Pokud jsou v provozu dvě turbíny (2TG) na VE Orlík, je průtok roven $300 \text{ m}^3/\text{s}$ apod.

Vždy je provedena dvojice simulací, kdy průtok vodní elektrárnou je totožný a výchozí hladina se liší. Pro simulace, kdy je v provozu pouze VE Orlík, je první výchozí hladina zvolena jako minimální hladina vyrovnávacího prostoru (282,10 m n. m. – Tab. 2.1) a druhá hladina je zvolena tak, aby maximální dosažená hladina v průběhu modelované epizody nepřekročila maximální hladinu vyrovnávacího prostoru (284,60 m n. m. - Tab. 2.1). Pro simulace, kdy je v provozu pouze VE Kamýk, je první výchozí hladina zvolena jako maximální hladina vyrovnávacího prostoru (284,60 m n. m. - Tab. 2.1) a druhá výchozí hladina je zvolena tak, aby minimální dosažená hladina v průběhu modelované epizody neklesla pod minimální hladinu vyrovnávacího prostoru (282,10 m n. m. – Tab. 2.1). Seznam simulací je uveden v Tab. 6.1 a Tab. 6.2.

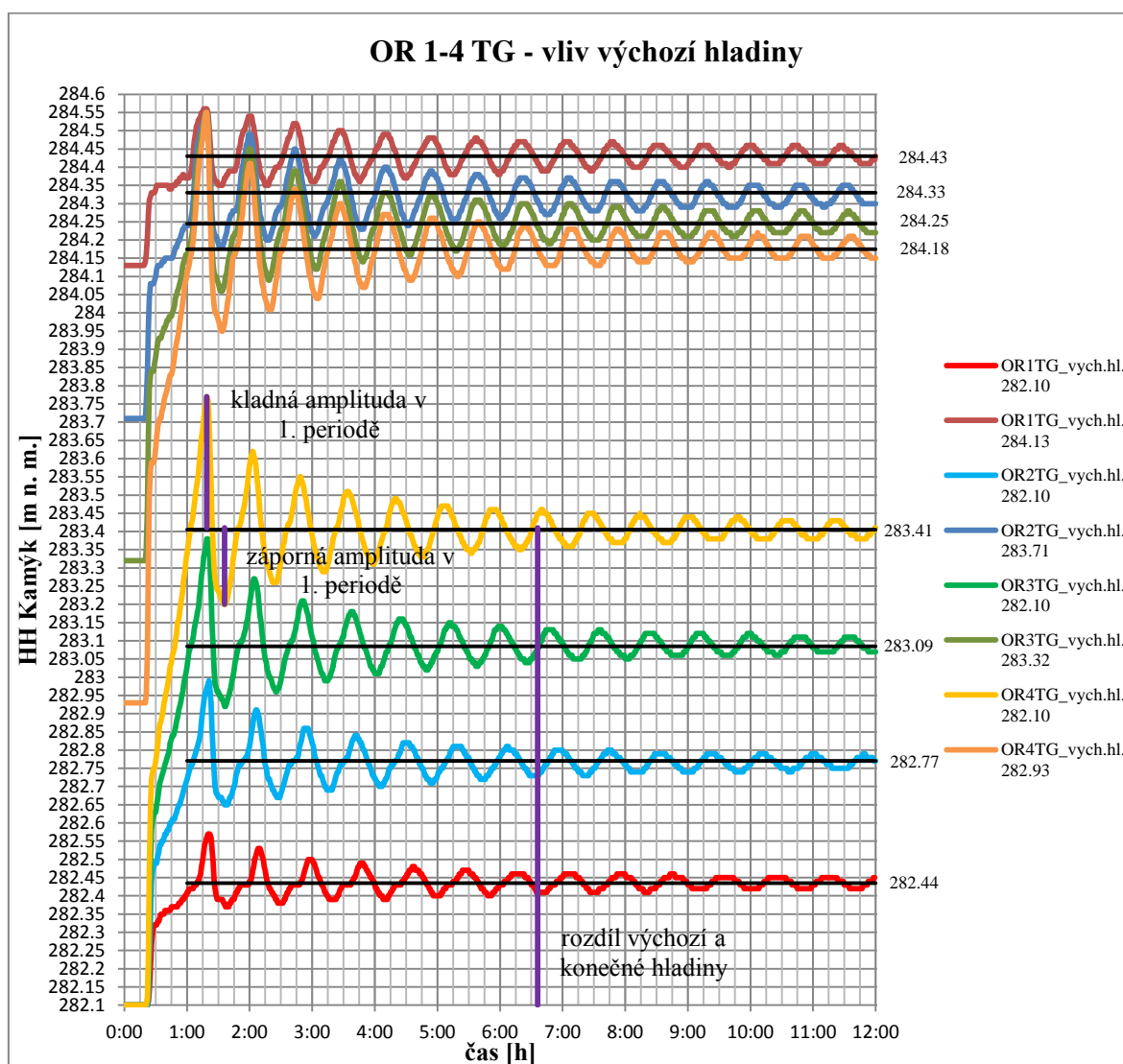
Tab. 6.1 Vliv výchozí hladiny - seznam simulací - VE Orlík

		1TG		2TG		3TG		4TG	
průtok	[m ³ /s]	150		300		450		600	
výchozí hladina	[m n. m.]	282.10	284.13	282.10	283.71	282.10	283.32	282.10	282.93

Tab. 6.2 Vliv výchozí hladiny - seznam simulací - VE Kamýk

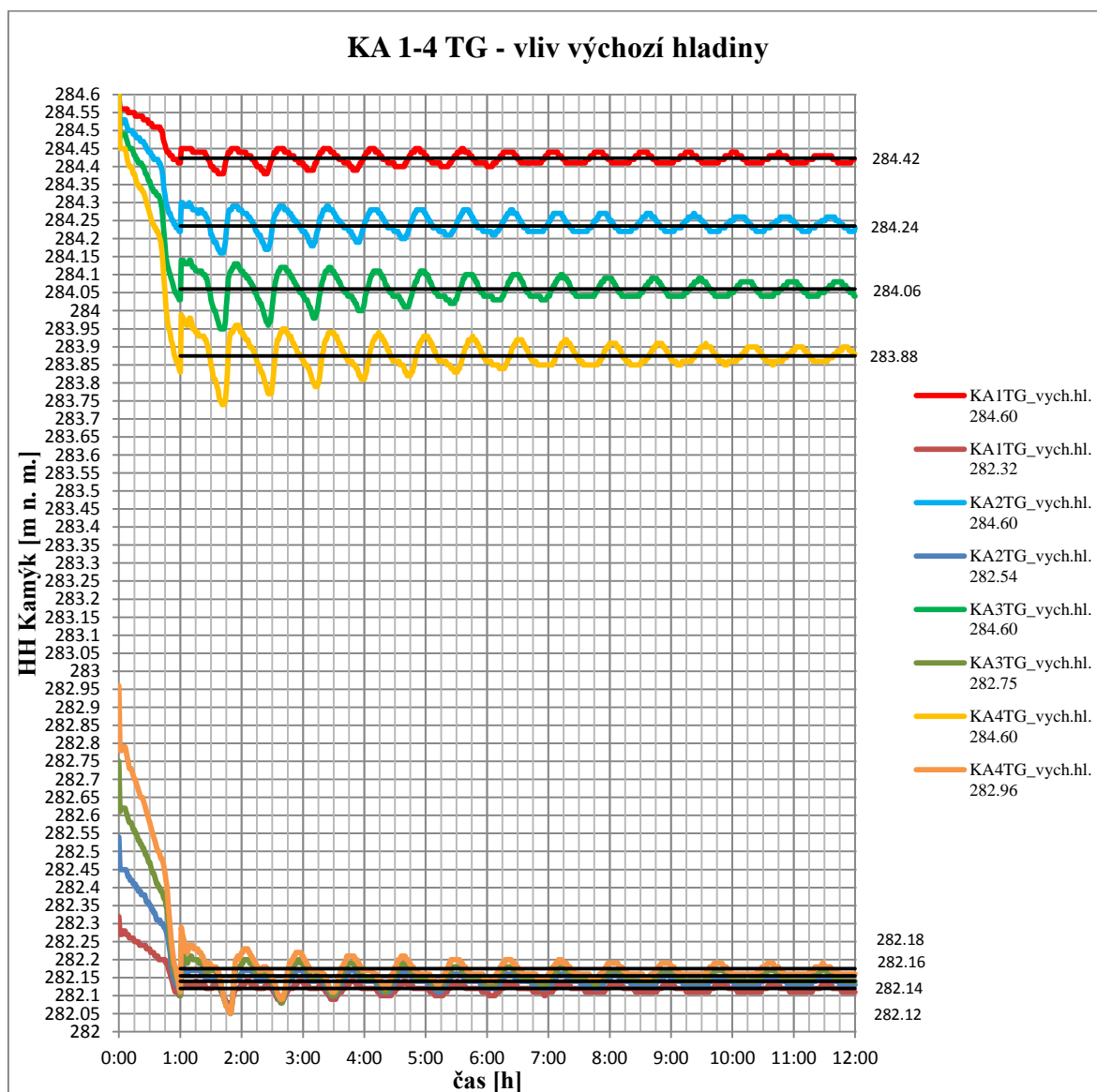
		1TG		2TG		3TG		4TG	
průtok	[m ³ /s]	90		180		270		360	
výchozí hladina	[m n. m.]	284.60	282.32	284.60	282.54	284.60	282.75	284.60	282.96

Graf 6.9 Vliv výchozí hladiny - VE Orlik 1-4 TG



Výstup simulací, tedy průběh hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk), je znázorněn v Grafu 6.9 (vyrábí pouze VE Orlik) a Grafu 6.10 (vyrábí pouze VE Kamýk). Pro každou simulaci je odečtena velikost kladné amplitudy v 1. periodě, velikost záporné amplitudy v 1. periodě (obě velikosti amplitud jsou vztaženy k teoretické ustálené hladině) a rozdíl výchozí a konečné teoreticky ustálené hladiny (Graf 6.9 – fialová linka). Hodnota teoreticky ustálené hladiny je odečtena z Grafu 6.9 a Grafu 6.10. Tyto tři parametry jsou porovnány pro každou dvojici simulací. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 6.3 (vyrábí pouze VE Orlik) a Tab. 6.4 (vyrábí pouze VE Kamýk). Rozdíly jednotlivých parametrů mezi dvěma simulacemi se stejnými okrajovými podmínkami (výrobními režimy elektráren) a rozdílnou počáteční podmínkou (výchozí hladinou) jsou zaznamenány ve sloupci Δ . Maximální hodnota delty v absolutní hodnotě je 0,06 m.

Graf 6.10 Vliv výchozí hladiny - VE Kamýk 1-4 TG



Tab. 6.3 Vliv výchozí hladiny - VE Orlík 1-4 TG

		1TG		Δ [m]	2TG		Δ [m]	3TG		Δ [m]	4TG		Δ [m]
výchozí hladina	[m n. m.]	282.10	284.13		282.10	283.71		282.10	283.32		282.10	282.93	
teoretická ustálená hladina	[m n. m.]	282.44	284.43		282.77	284.33		283.09	284.25		283.41	284.18	
rozdíl výchozí a konečné hl.	[m]	0.33	0.30	-0.03	0.67	0.62	-0.05	0.98	0.92	-0.06	1.30	1.24	-0.06
kladná amplituda v 1. periodě	[m]	0.13	0.13	0.00	0.22	0.22	0.00	0.30	0.31	0.01	0.37	0.38	0.01
záporná amplituda v 1. periodě	[m]	0.06	0.08	0.02	0.12	0.15	0.03	0.16	0.19	0.03	0.20	0.23	0.02

Tab. 6.4 Vliv výchozí hladiny - VE Kamýk 1-4 TG

		1TG		Δ [m]	2TG		Δ [m]	3TG		Δ [m]	4TG		Δ [m]
výchozí hladina	[m n. m.]	284.60	282.32		284.60	282.54		284.60	282.75		284.60	282.96	
teoretická ustálená hladina	[m n. m.]	284.42	282.12		284.24	282.14		284.06	282.16		283.88	282.18	
rozdíl výchozí a konečné hl.	[m]	0.18	0.20	0.02	0.37	0.40	0.03	0.54	0.60	0.06	0.73	0.79	0.06
kladná amplituda v 1. periodě	[m]	0.03	0.02	-0.01	0.06	0.05	-0.01	0.08	0.09	0.01	0.12	0.12	0.00
záporná amplituda v 1. periodě	[m]	0.04	0.05	0.01	0.07	0.07	0.00	0.11	0.10	-0.01	0.13	0.13	0.00

Z výsledků vyplývá, že v případě, že výchozí hladina pro simulace, ze kterých odečítáme vlastnosti dynamických vln, je zvolena jako střední hladina vyrovnávacího prostoru, je teoretická chyba způsobená rozdílnou výchozí hladinou reálné situace malá (cca do 0,05 m) a vliv výchozí hladiny může být zanedbán. Střední hladina, která je zadávána ve všech následujících simulacích jako počáteční podmínka, má hodnotu 283,35 m n. m (polovina výšky vyrovnávacího prostoru).

6.5 Simulace provozních režimů VE

Jednotlivé provozní režimy simulované ve výpočetním programu jsou zvoleny stejně jako v kapitole 6.4. Je tedy provedeno celkem osm simulací, čtyři pro případ provozu pouze VE Orlík (1-4 TG) a čtyři pro případ provozu pouze VE Kamýk (1-4 TG). Takto zvolené simulace umožňují identifikovat jednoduše vlastnosti dynamických vln v závislosti na výrobním režimu elektráren. Počáteční podmínka je pro všechny simulace stejná, rovna střední hladině vyrovnávacího prostoru 283,35 m n. m (kapitola 6.4). Každá simulace začíná v čase 0:00 spuštěním provozu vodní elektrárny. Ukončení provozu elektrárny je v čase 1:00 a průtok je po celou dobu (1 hodina) konstantní. Průtok vodní elektrárnou odpovídá součtu hlností turbín, které jsou v provozu. Pokud je v provozu jedna turbína (1TG) na VE Orlík, je průtok roven 150 m³/s (kapitola 2.3). Pokud jsou v provozu dvě turbíny (2TG) na VE Orlík, je průtok roven 300 m³/s apod. Seznam simulací je uveden v Tab. 6.5 a Tab. 6.6.

Tab. 6.5 Simulace provozních režimů - VE Orlík

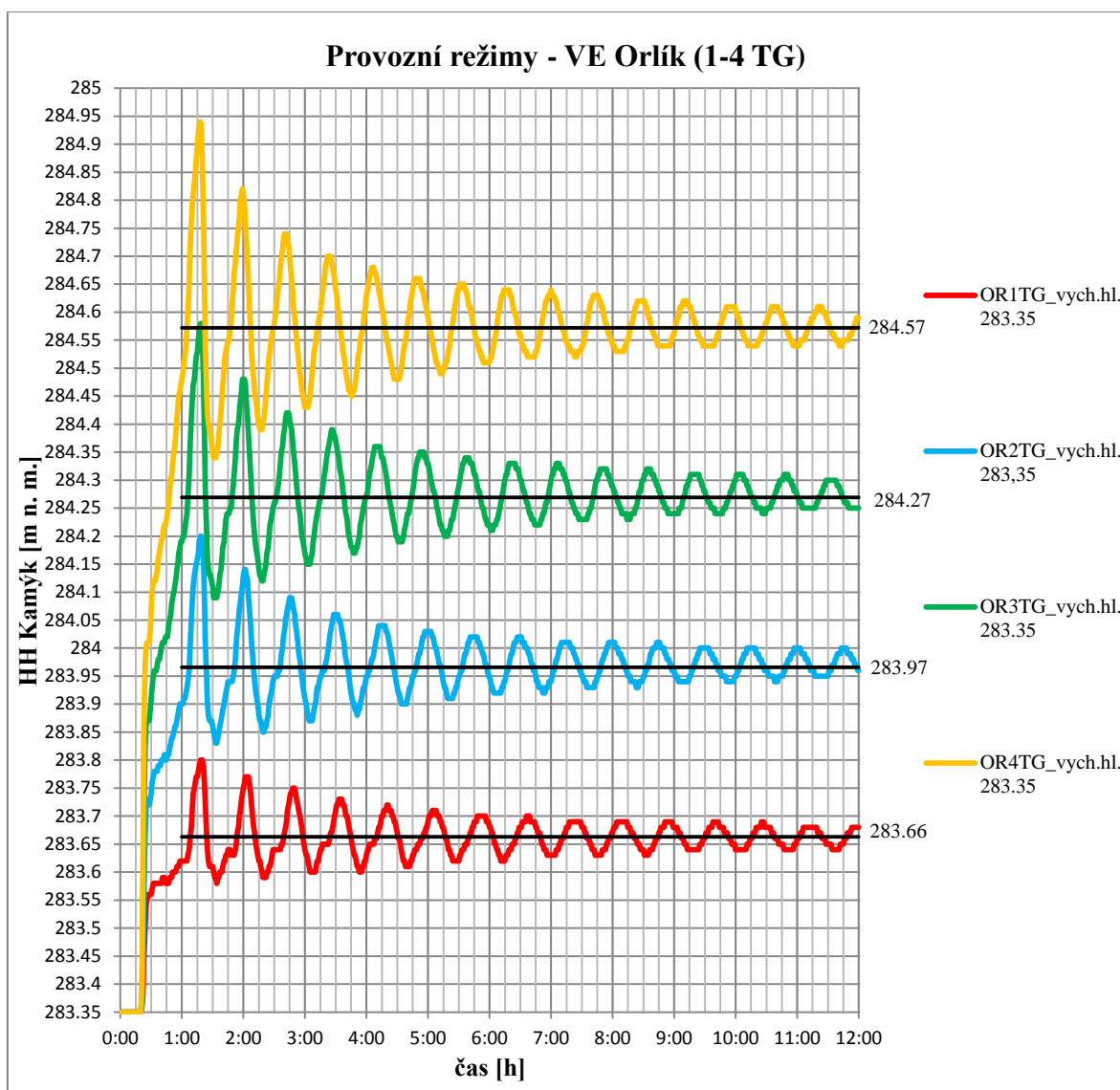
		1TG	2TG	3TG	4TG
průtok	[m ³ /s]	150	300	450	600
výchozí hladina	[m n. m.]	283.35	283.35	283.35	283.35

Tab. 6.6 Simulace provozních režimů - VE Kamýk

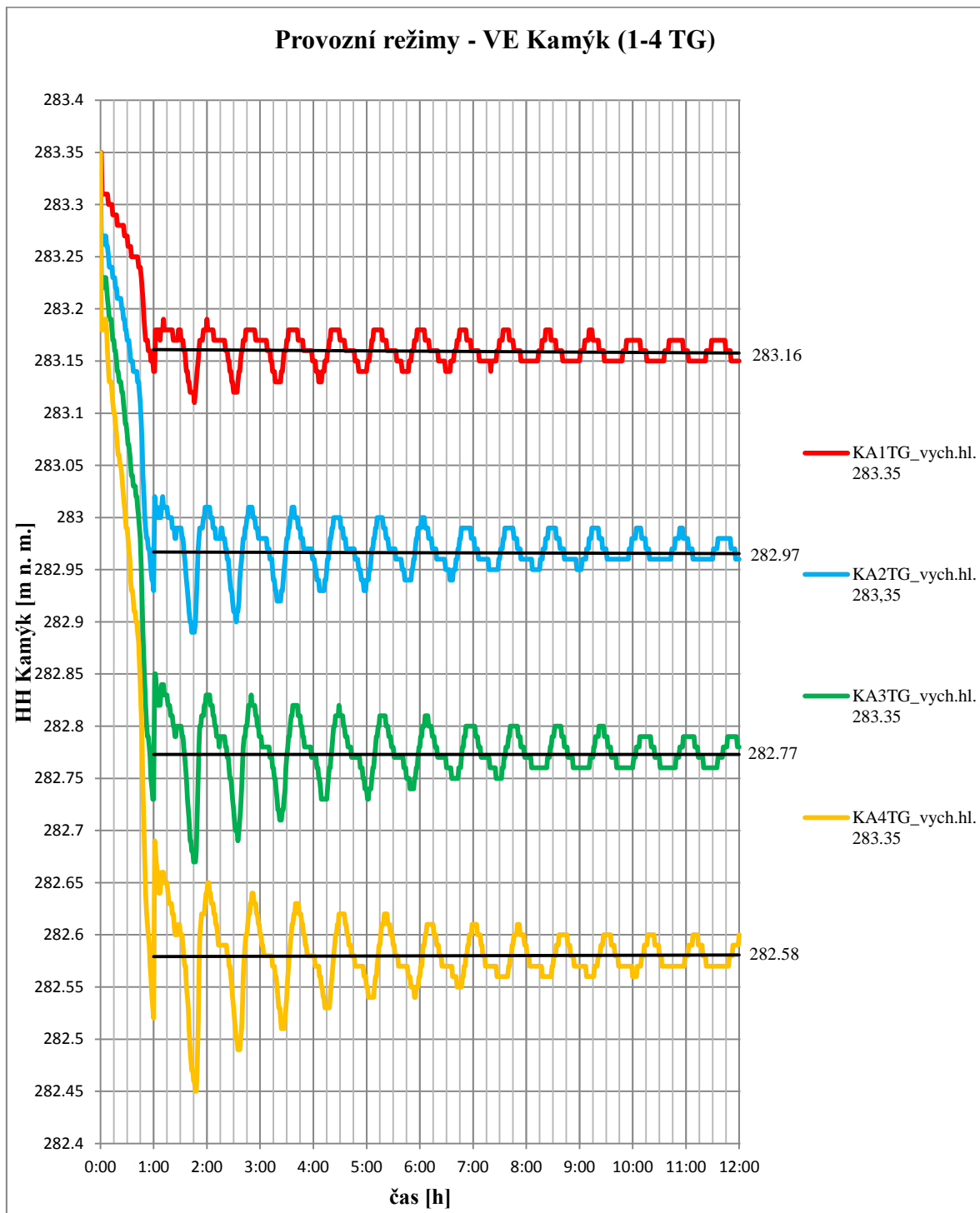
		1TG	2TG	3TG	4TG
průtok	[m ³ /s]	90	180	270	360
výchozí hladina	[m n. m.]	283.35	283.35	283.35	283.35

Výsledky simulací, tedy průběh hladiny v profilu hráze VD Kamýk (HH Kamýk), jsou znázorněny v Grafu 6.11 (vyrábí pouze VE Orlík) a Grafu 6.12 (vyrábí pouze VE Kamýk).

Graf 6.11 Provozní režimy - VE Orlík (1-4 TG)



Graf 6.12 Provozní režimy - VE Kamýk (1-4 TG)



7 VLASTNOSTI DYNAMICKÝCH VLN

Z výsledků simulací popsaných v kapitole 6.5 jsou získány vlastnosti dynamických vln dle metodiky dané v kapitole 3.2. Soupis vlastností je proveden pro všech 8 simulací znázorněných v Grafu 6.11 a Grafu 6.12 a výsledky jsou zaznamenány v Tab. 7.1 až Tab. 7.8. V Tab. 7.1 až Tab. 7.4 jsou vlastnosti dynamických vln v případě provozu VE Orlík (vyplývají z Grafu 6.11) a v Tab. 7.5 až Tab. 7.8 jsou vlastnosti dynamických vln v případě provozu VE Kamýk (vyplývají z Grafu 6.12).

Tab. 7.1 Vlastnosti dynamických vln - kladné amplitudy - VE Orlík

		OR - kladná amplituda				
		[m]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	150	0.14	0.11	0.09	0.07	0.06
2TG	300	0.23	0.17	0.12	0.09	0.07
3TG	450	0.31	0.21	0.15	0.12	0.09
4TG	600	0.37	0.25	0.17	0.13	0.11

Tab. 7.2 Vlastnosti dynamických vln - záporné amplitudy - VE Orlík

		OR - záporná amplituda				
		[m]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	150	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05
2TG	300	0.14	0.12	0.10	0.09	0.07
3TG	450	0.18	0.15	0.12	0.10	0.08
4TG	600	0.23	0.18	0.14	0.12	0.09

Tab. 7.3 Vlastnosti dynamických vln - periody - VE Orlík

		T				
		[s]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	150	2730	2730	2700	2700	2700
2TG	300	2640	2700	2640	2640	2700
3TG	450	2580	2580	2580	2640	2700
4TG	600	2520	2520	2580	2640	2640

Tab. 7.4 Vlastnosti dynamických vln - počáteční vs. konečná hladina - VE Orlík

		počáteční hladina	ustálená hladina	rozdíl
TG	m ³ /s	[m n. m.]		[m]
1TG	90	283.35	283.66	0.31
2TG	180	283.35	283.97	0.62
3TG	270	283.35	284.27	0.92
4TG	360	283.35	284.57	1.22

Tab. 7.5 Vlastnosti dynamických vln - kladné amplitudy - VE Kamýk

		KA - kladná amplituda				
		[m]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	90	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
2TG	180	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03
3TG	270	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
4TG	360	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04

Tab. 7.6 Vlastnosti dynamických vln - záporné amplitudy - VE Kamýk

		KA - záporná amplituda				
		[m]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	90	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02
2TG	180	0.08	0.07	0.05	0.05	0.04
3TG	270	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
4TG	360	0.13	0.09	0.07	0.05	0.04

Tab. 7.7 Vlastnosti dynamických vln - periody - VE Kamýk

		T				
		[s]				
		perioda				
TG	m ³ /s	1	2	3	4	5
1TG	90	3000	2880	2940	2880	2880
2TG	180	2940	3000	2940	2940	2880
3TG	270	2940	3000	3000	3000	2940
4TG	360	3150	2790	3000	2880	3180

Tab. 7.8 Vlastnosti dynamických vln - počáteční vs. konečné hladiny - VE Kamýk

		počáteční hladina	ustálená hladina	rozdíl
TG	m ³ /s	[m n. m.]		[m]
1TG	90	283.35	283.16	-0.19
2TG	180	283.35	282.97	-0.38
3TG	270	283.35	282.77	-0.58
4TG	360	283.35	282.58	-0.77

7.1 Linearita vlastností dynamických vln

V kapitole 3 je řečeno, že koeficienty matematických funkcí popisujících průběh kladných a záporných amplitud jsou definovány na základě vlastností amplitud pro výrobní režimy simulované v kapitole 6.5. Tento postup uvažuje, že koeficienty rovnice popisující průběh amplitud jsou stanoveny na základě znalosti vlastností amplitudy ve čtyřech styčných bodech (1-4 TG při provozu VE Orlík nebo VE Kamýk). Rovnice se stejnými koeficienty jsou pak platné i pro výrobní režimy, které nejsou jednotlivě simulovány (nacházejí se mezi jednotlivými styčnými body). Správnost tohoto tvrzení je ověřena pomocí zobrazení odečtených velikostí amplitudy v jednotlivých periodách v závislosti na výrobním režimu v grafu a proložením daných hodnot přímkou pomocí metody lineární regrese. Odečtené velikosti amplitud jsou zapsány v Tab. 7.1, Tab. 7.2, Tab. 7.5 a Tab. 7.6. a jsou vyneseny v Grafu 7.1 až Grafu 7.20. V Grafu 7.1 až Grafu 7.5 je znázorněna velikost kladné amplitudy v 1. až 5. periodě v závislosti na průtoku VE Orlík. V Grafu 7.6 až Grafu 7.10 je znázorněna velikost záporné amplitudy v 1. až 5. periodě v závislosti na průtoku VE Orlík. V Grafu 7.11 až Grafu 7.15 je znázorněna velikost kladné amplitudy v 1. až 5. periodě v závislosti na průtoku VE Kamýk a v Grafu 7.16 až Grafu 7.20 je znázorněna velikost záporné amplitudy v 1. až 5. periodě v závislosti na průtoku VE Kamýk. Ve všech grafech jsou hodnoty získané ze simulací proloženy přímkou a je proveden zpětný výpočet pomocí lineární rovnice ve tvaru:

$$y = Ax + B, \quad (5)$$

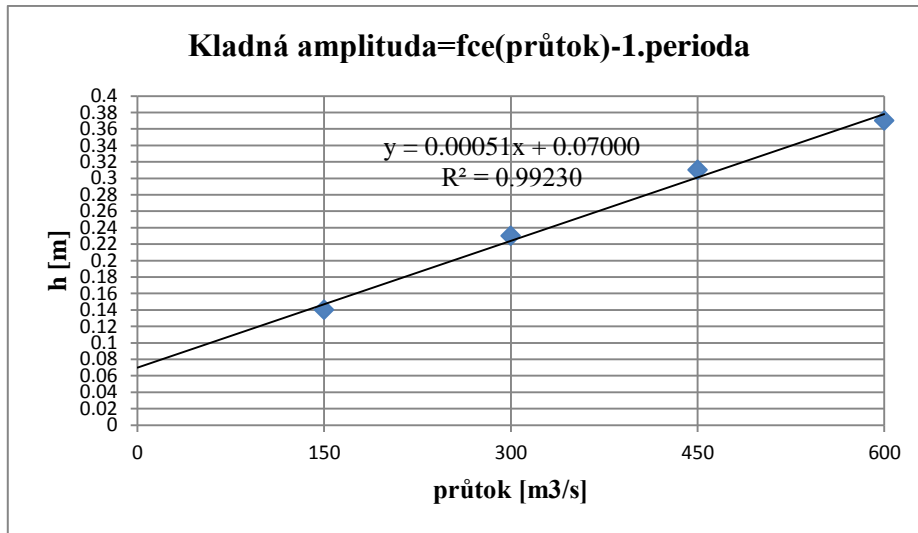
kde: y je velikost amplitudy,

x je hodnota průtoku,

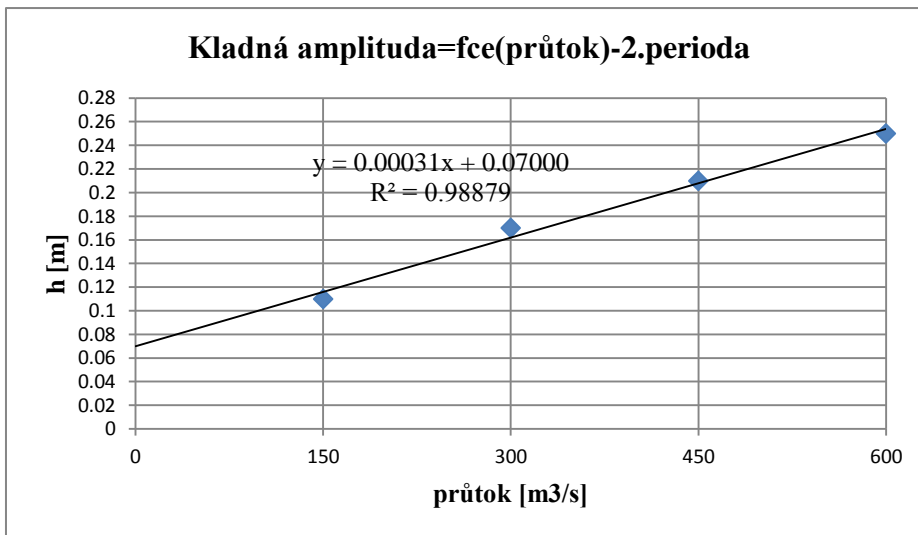
A,B jsou koeficienty získané z lineární regrese.

Koeficienty A a B pro jednotlivé výrobní režimy elektráren jsou znázorněny v Tab. 7.9 až Tab. 7.12, kde jsou také sepsány hodnoty jednotlivých amplitud získané ze simulací (Tab. 7.1, Tab. 7.2, Tab. 7.5 a Tab. 7.6) a hodnoty amplitud stanovené výpočtem (rovnice (5)). Maximální rozdíl mezi hodnotami je 0,01 m a je tak prokázána linearita velikostí amplitud v závislosti na výrobním režimu elektráren.

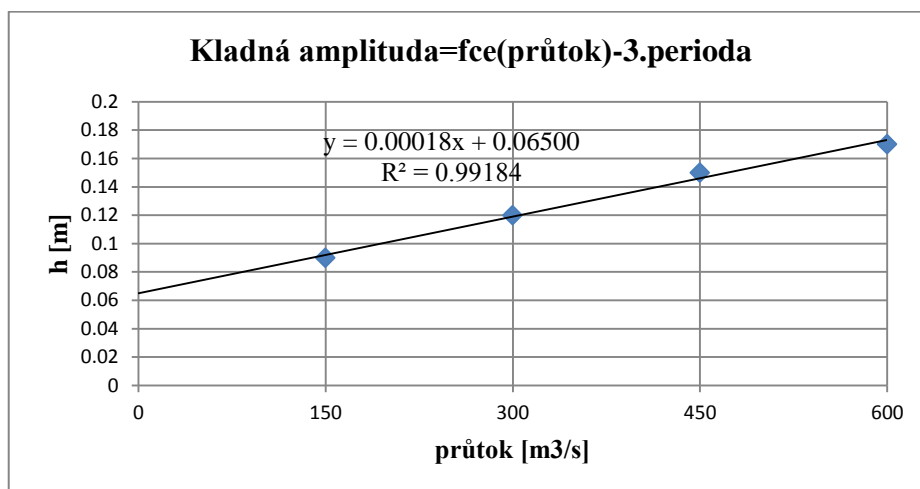
Graf 7.1 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 1. perioda



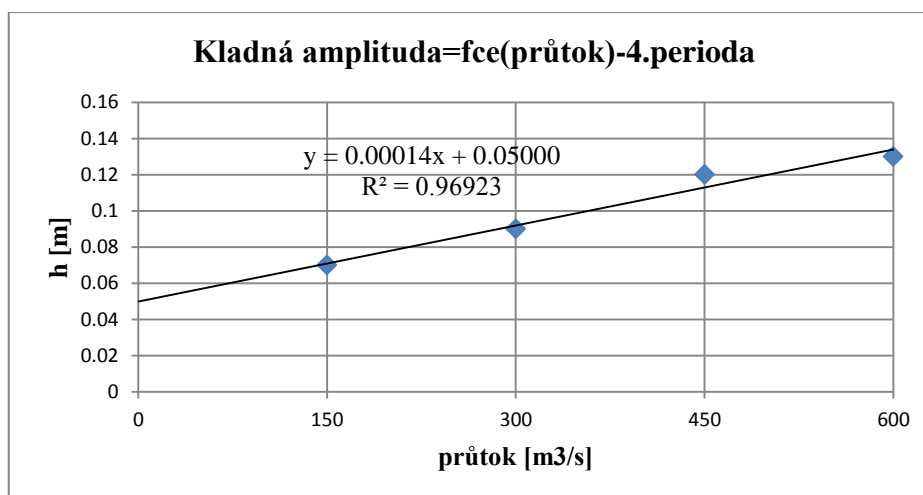
Graf 7.2 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 2. perioda



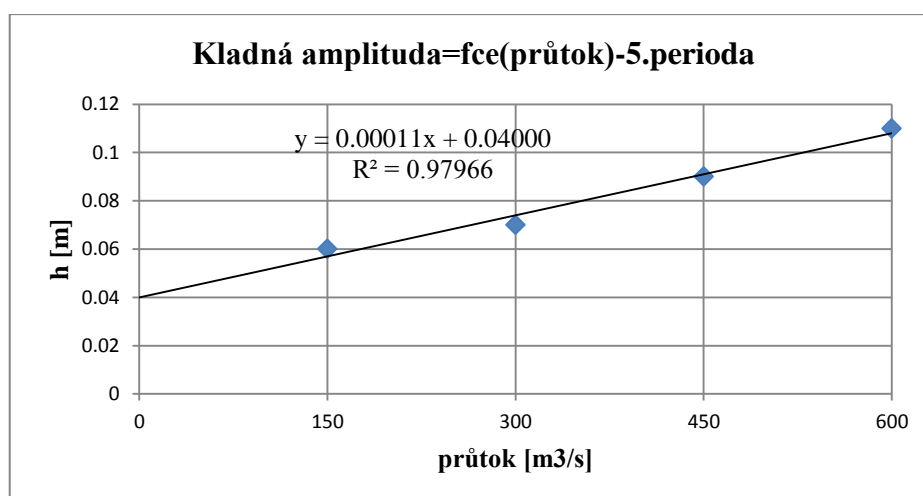
Graf 7.3 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 3. perioda



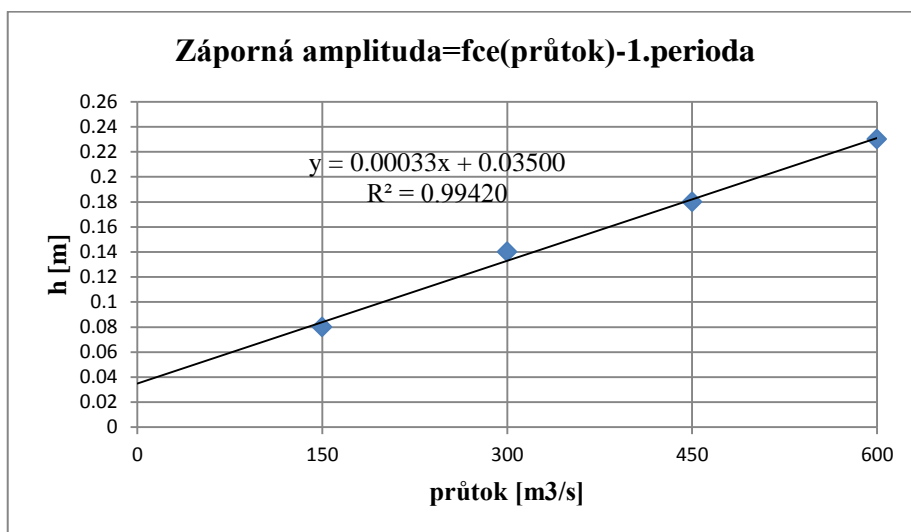
Graf 7.4 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 4. perioda



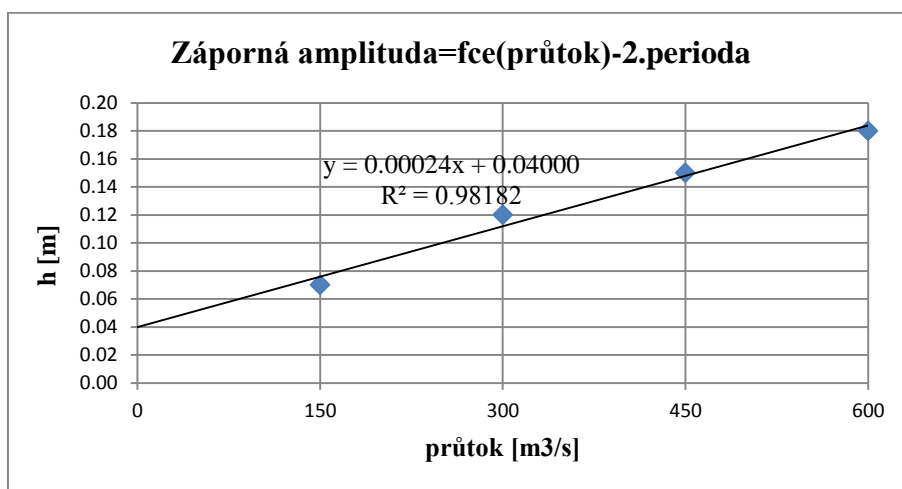
Graf 7.5 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 5. perioda



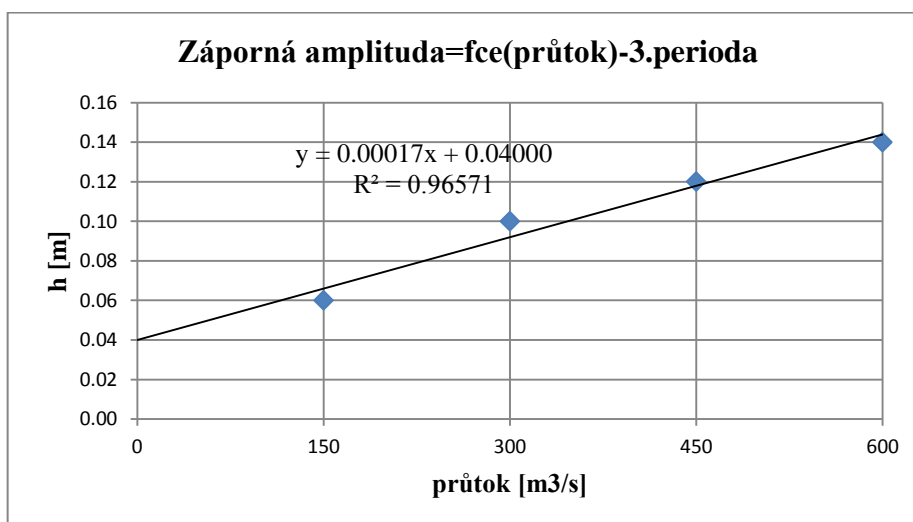
Graf 7.6 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 1. perioda



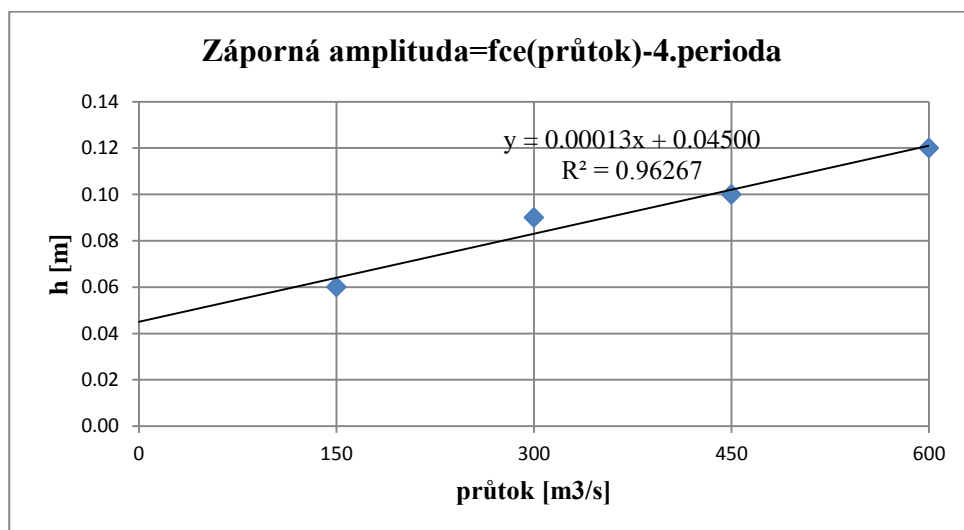
Graf 7.7 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 2. perioda



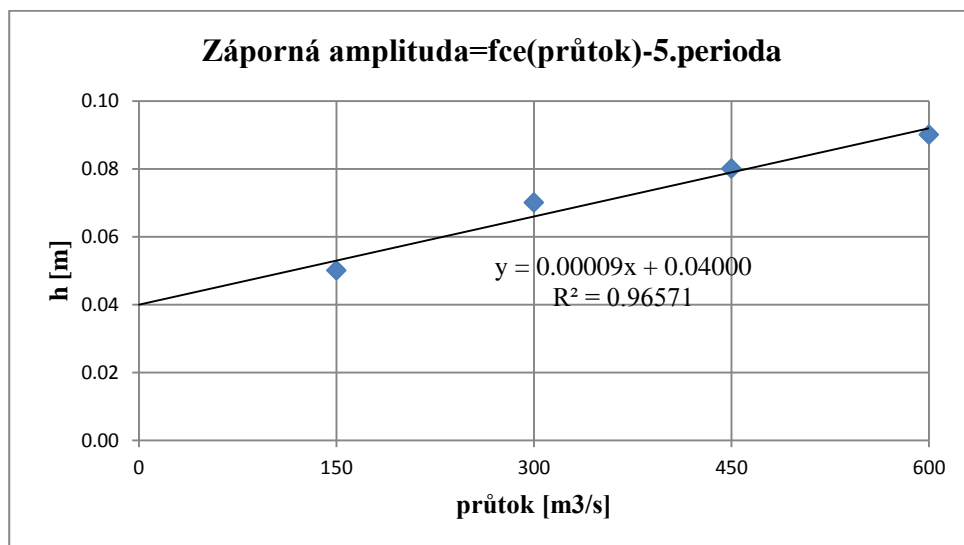
Graf 7.8 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 3. perioda



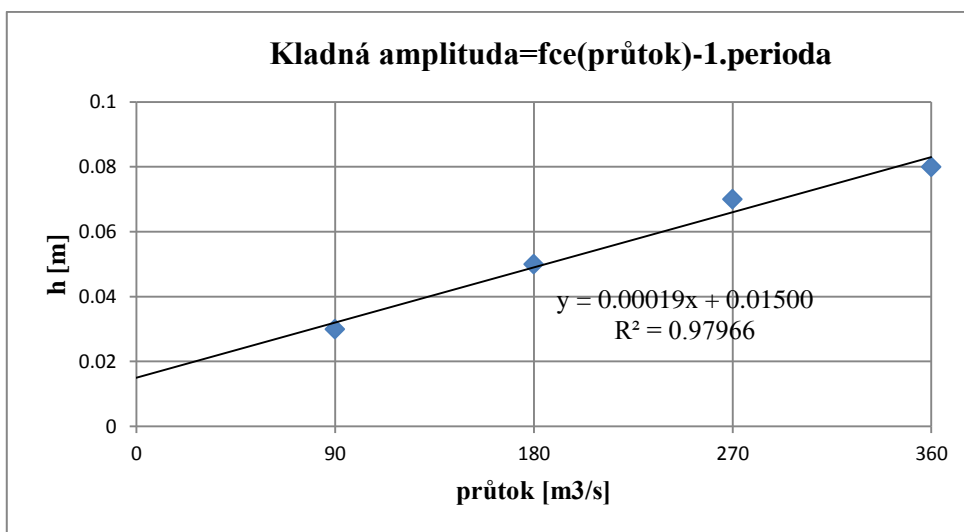
Graf 7.9 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 4. perioda



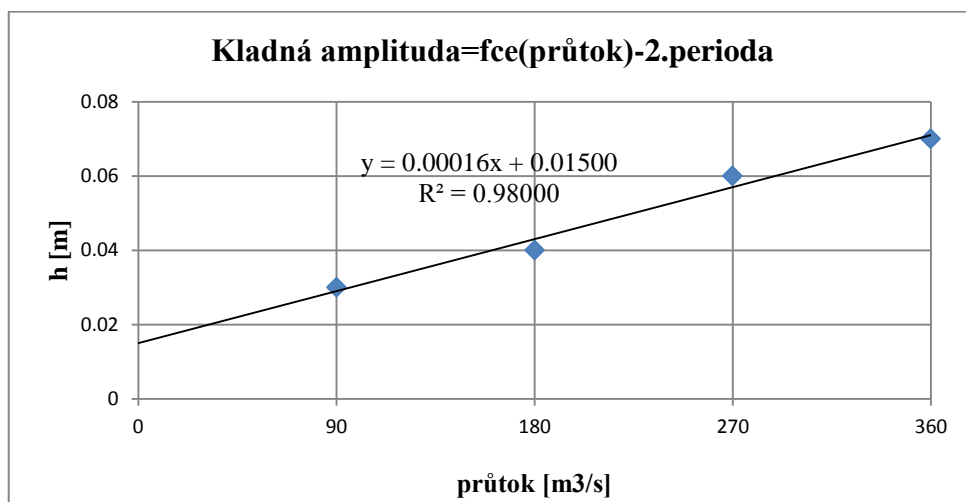
Graf 7.10 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 5. perioda



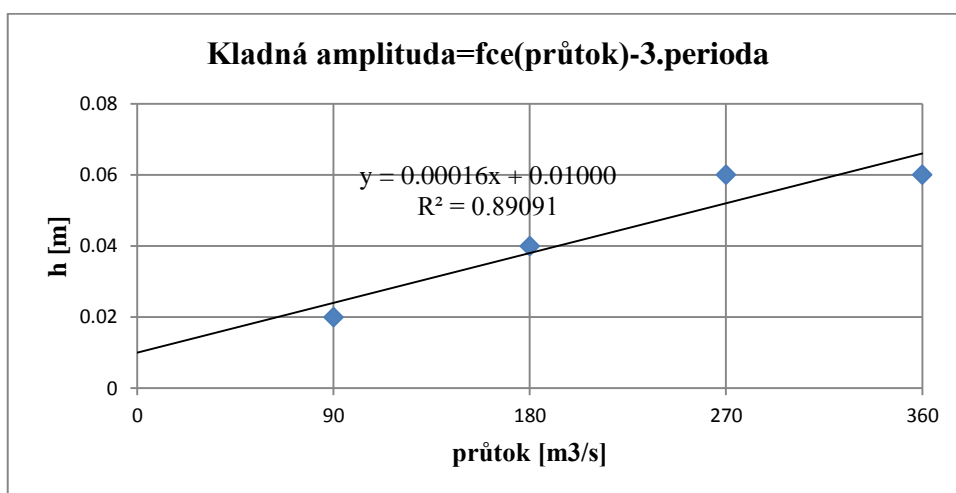
Graf 7.11 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 1. perioda



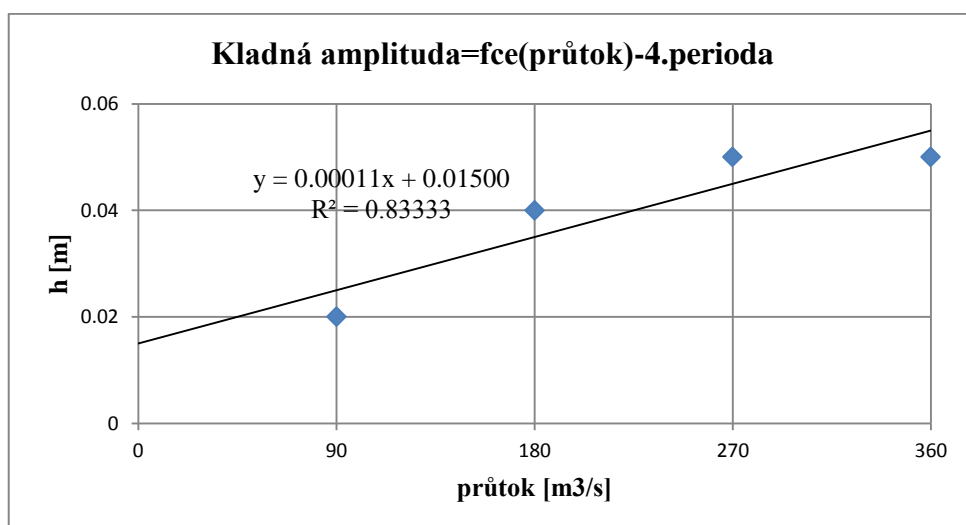
Graf 7.12 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 2. perioda



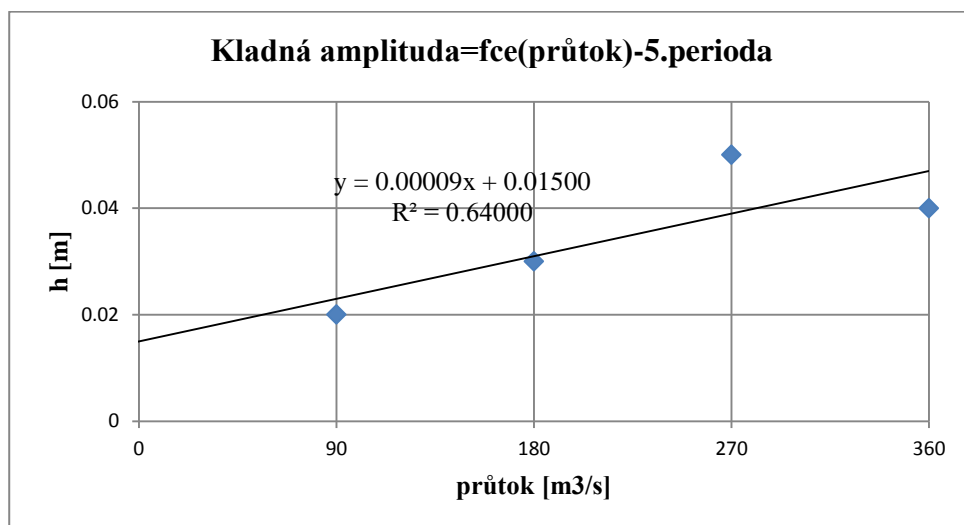
Graf 7.13 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 3. perioda



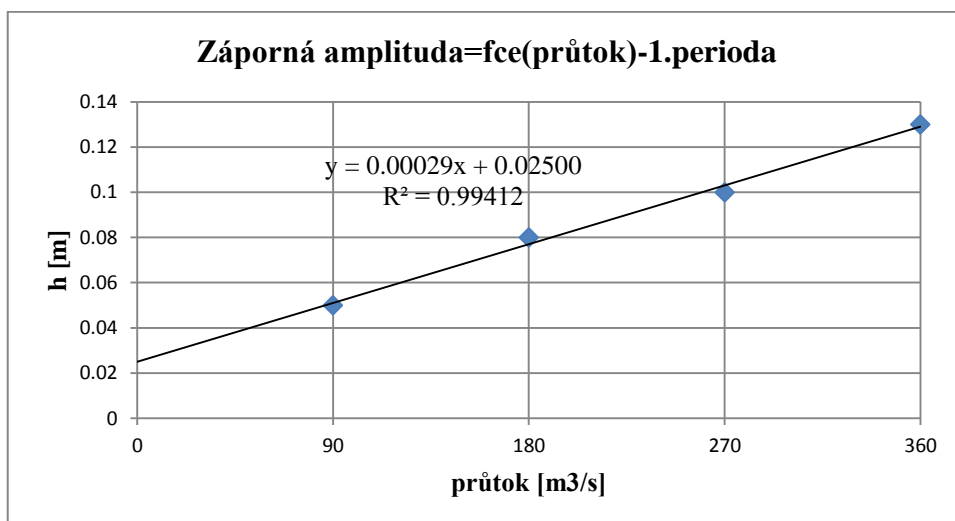
Graf 7.14 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 4. perioda



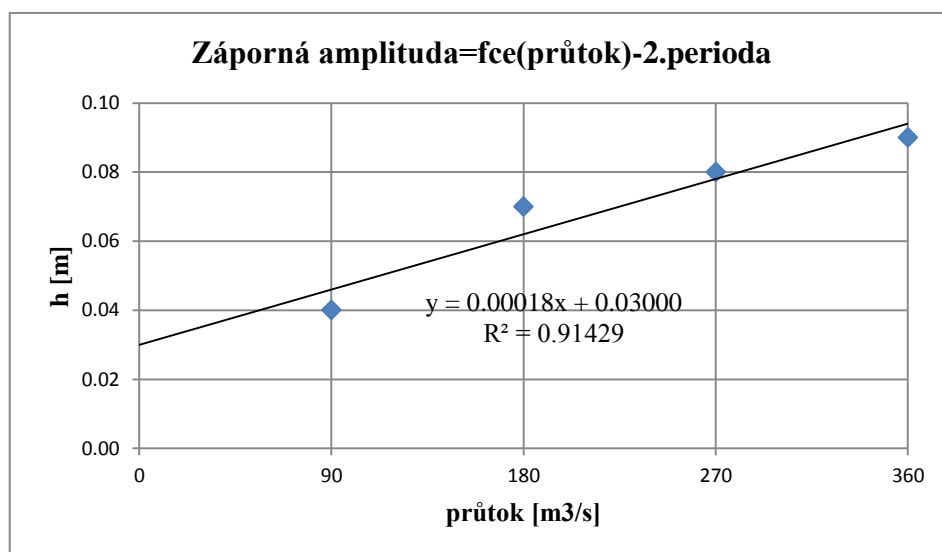
Graf 7.15 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 5. perioda



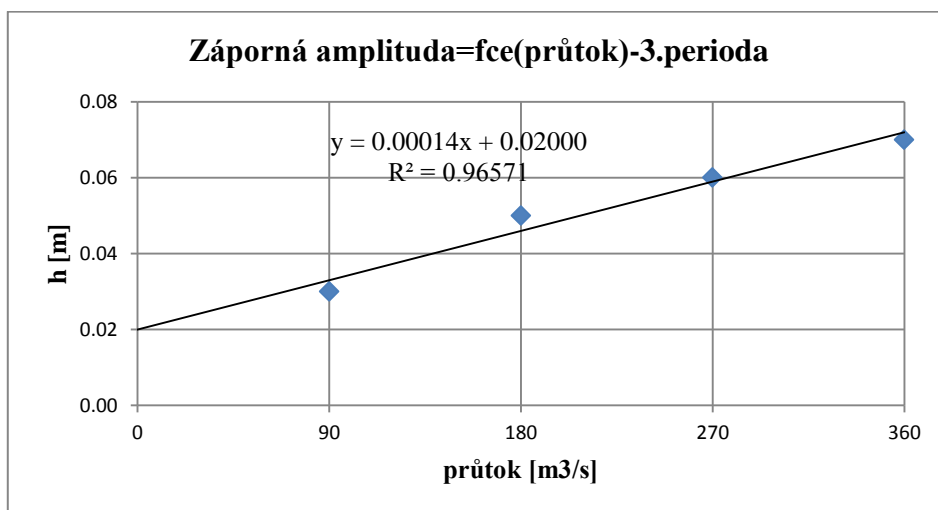
Graf 7.16 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 1. perioda



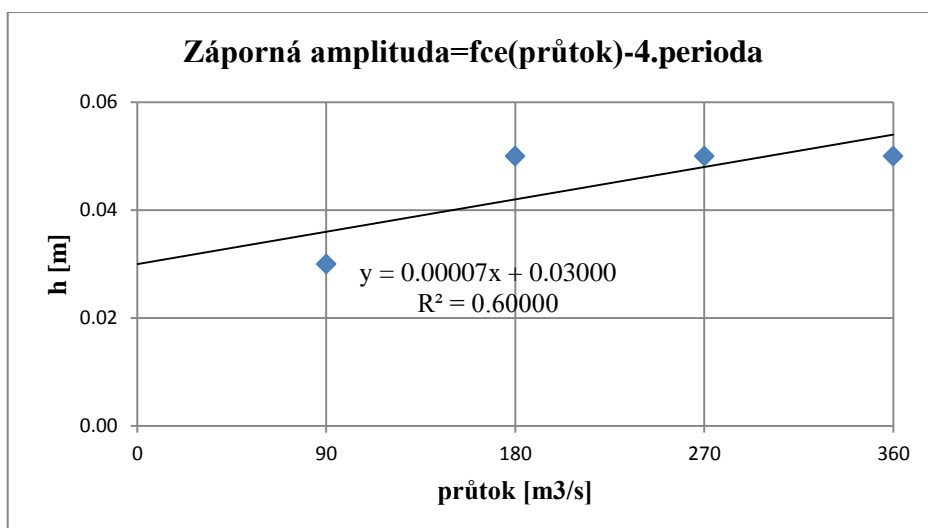
Graf 7.17 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 2. perioda



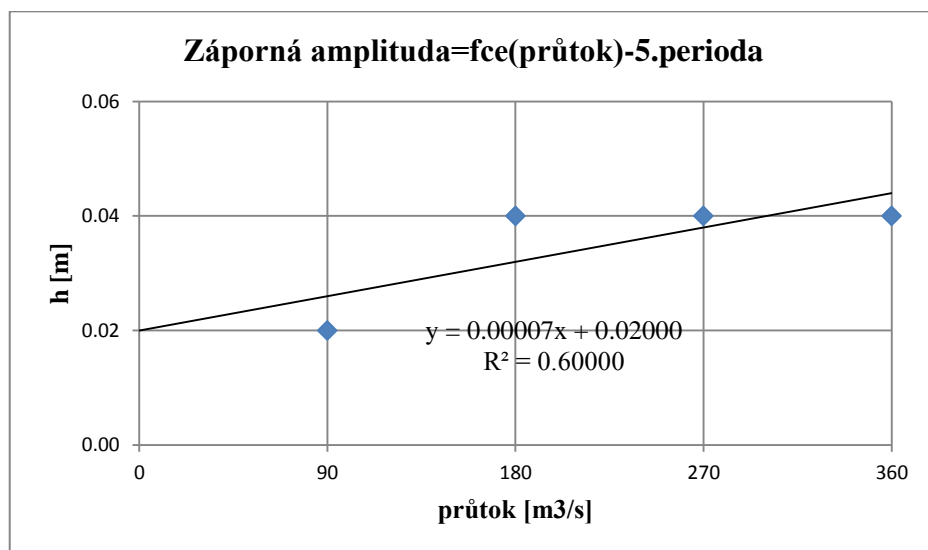
Graf 7.18 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 3. perioda



Graf 7.19 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 4. perioda



Graf 7.20 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 5. perioda



Tab. 7.9 Linearita kladné amplitudy - VE Orlik

perioda	TG	hodnota koeficientů		kladná amplituda		chyba
		A	B	z HEC-RASU	z výpočtu	
1	1	0.00051	0.07000	0.14	0.15	0.01
	2			0.23	0.22	-0.01
	3			0.31	0.30	-0.01
	4			0.37	0.38	0.01
2	1	0.00031	0.07000	0.11	0.12	0.01
	2			0.17	0.16	-0.01
	3			0.21	0.21	0.00
	4			0.25	0.25	0.00
3	1	0.00018	0.06500	0.09	0.09	0.00
	2			0.12	0.12	0.00
	3			0.15	0.15	0.00
	4			0.17	0.17	0.00
4	1	0.00014	0.05000	0.07	0.07	0.00
	2			0.09	0.09	0.00
	3			0.12	0.11	-0.01
	4			0.13	0.13	0.00
5	1	0.00011	0.04000	0.06	0.06	0.00
	2			0.07	0.07	0.00
	3			0.09	0.09	0.00
	4			0.11	0.11	0.00

Tab. 7.10 Linearita záporné amplitudy - VE Orlik

;	TG	hodnota koeficientů		záporná amplituda		chyba
		A	B	z HEC-RASU	z výpočtu	
1	1	0.00033	0.03500	0.08	0.08	0.00
	2			0.14	0.13	-0.01
	3			0.18	0.18	0.00
	4			0.23	0.23	0.00
2	1	0.00024	0.04000	0.07	0.08	0.01
	2			0.12	0.11	-0.01
	3			0.15	0.15	0.00
	4			0.18	0.18	0.00
3	1	0.00017	0.04000	0.06	0.07	0.01
	2			0.10	0.09	-0.01
	3			0.12	0.12	0.00
	4			0.14	0.14	0.00
4	1	0.00013	0.04500	0.06	0.06	0.00
	2			0.09	0.08	-0.01
	3			0.10	0.10	0.00
	4			0.12	0.12	0.00
5	1	0.00009	0.04000	0.05	0.05	0.00
	2			0.07	0.07	0.00
	3			0.08	0.08	0.00
	4			0.09	0.09	0.00

Tab. 7.11 Linearita kladné amplitudy – VE Kamýk

perioda	TG	hodnota koeficientů		kladná amplituda		chyba
		A	B	z HEC-RASU	z výpočtu	
1	1	0.00019	0.015	0.03	0.03	0.00
	2			0.05	0.05	0.00
	3			0.07	0.07	0.00
	4			0.08	0.08	0.00
2	1	0.00016	0.015	0.03	0.03	0.00
	2			0.04	0.04	0.00
	3			0.06	0.06	0.00
	4			0.07	0.07	0.00
3	1	0.00016	0.01	0.02	0.02	0.00
	2			0.04	0.04	0.00
	3			0.06	0.05	-0.01
	4			0.06	0.07	0.01
4	1	0.00011	0.015	0.02	0.02	0.00
	2			0.04	0.03	0.00
	3			0.05	0.04	-0.01
	4			0.05	0.06	0.01
5	1	0.00009	0.015	0.02	0.02	0.00
	2			0.03	0.03	0.00
	3			0.05	0.04	-0.01
	4			0.04	0.05	0.01

Tab. 7.12 Linearita záporné amplitudy - VE Kamýk

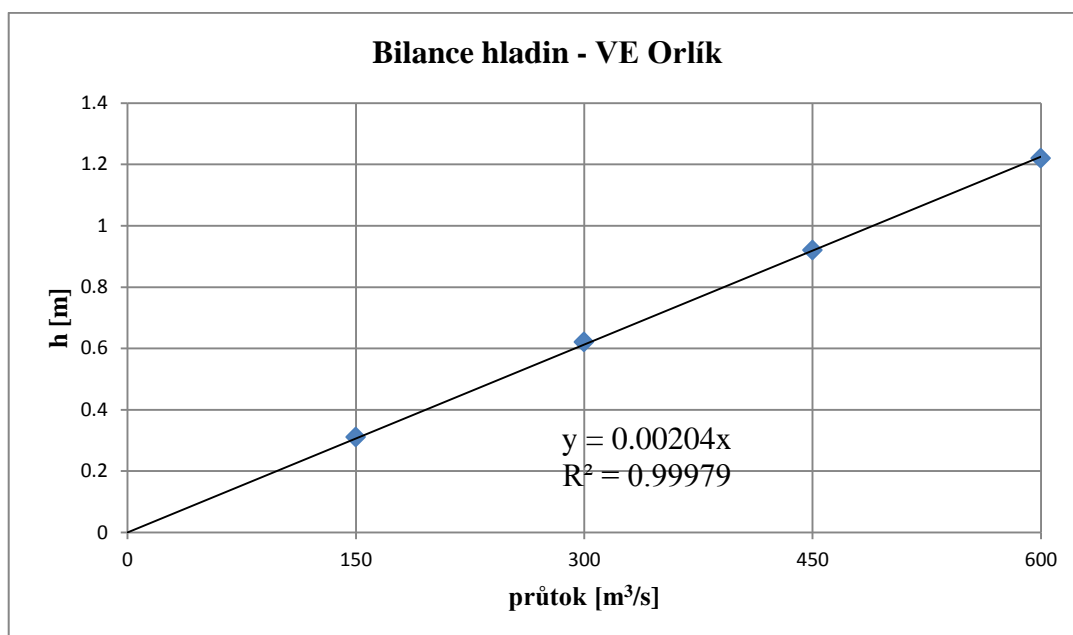
perioda	TG	hodnota koeficientů		záporná amplituda		chyba
		A	B	z HEC-RASU	z výpočtu	
1	1	0.00029	0.025	0.05	0.05	0.00
	2			0.08	0.08	0.00
	3			0.10	0.10	0.00
	4			0.13	0.13	0.00
2	1	0.00018	0.03	0.04	0.05	0.01
	2			0.07	0.06	-0.01
	3			0.08	0.08	0.00
	4			0.09	0.09	0.00
3	1	0.00014	0.02	0.03	0.03	0.00
	2			0.05	0.05	0.00
	3			0.06	0.06	0.00
	4			0.07	0.07	0.00
4	1	0.00007	0.03	0.03	0.04	0.01
	2			0.05	0.04	-0.01
	3			0.05	0.05	0.00
	4			0.05	0.05	0.00
5	1	0.00007	0.02	0.02	0.03	0.01
	2			0.04	0.03	-0.01
	3			0.04	0.04	0.00
	4			0.04	0.04	0.00

Zajímavým fenoménem, který se objevuje na Grafu 7.1 až Grafu 7.20, je, že pro nulové průtoky vodními elektrárnami je definovaná nenulová velikost kladné a záporné amplitudy. Toto tvrzení není v reálu přípustné a lze tedy konstatovat, že velikosti amplitud vznikajících při nízkých průtocích vodními elektrárnami (méně než 1 TG) mohou být na základě výpočtu nadhodnoceny.

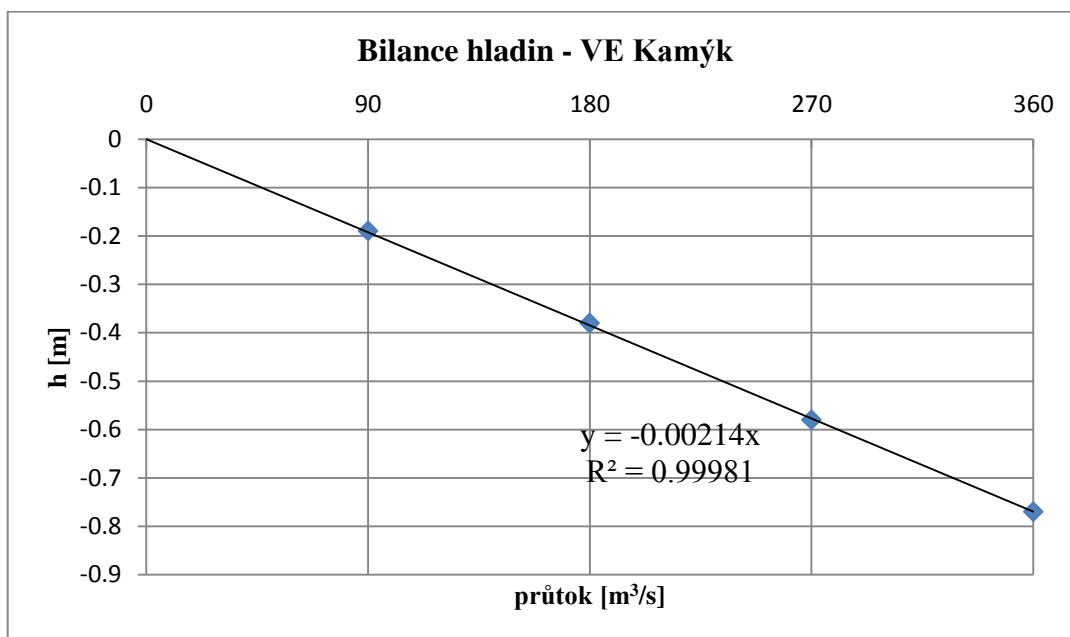
8 BILANČNÍ ROVNICE (TEORETICKÁ USTÁLENÁ HLADINA)

Podoba bilanční rovnice je popsána v kapitole 3.3 (rovnice (3)). Stanovení hodnoty koeficientů A_{OR} a A_{KA} je provedeno na základě známých nárůstů, respektive poklesů, hladiny v závislosti na průtoku VE Orlík nebo VE Kamýk (Tab. 7.4 a Tab. 7.8). Na Grafu 8.1 a Grafu 8.2 jsou body z tabulek vyneseny a jsou proloženy přímkou pomocí metody lineární regrese. Koeficienty dané regrese vyjadřují nárůst, respektive pokles, hladiny v závislosti na konstantním průtoku po dobu jedné hodiny (kapitola 6.5). V Tab. 8.1 jsou stanovené hodnoty koeficientu ověřeny pomocí zpětného výpočtu a jsou zaznamenány rozdíly mezi vypočítanou změnou výšky hladiny a původní změnou odečtenou z výsledků simulací v SW HEC-RAS. Hodnota maximální chyby je 0,01 m. Správnost stanovení koeficientů je tak prokázána. V kapitole 3.3 je stanovena délka výpočetního kroku na 1 minutu. Koeficienty získané metodou lineární regrese (Tab. 8.1) jsou tak vyděleny 60 (60 minut) a je tak stanovena míra nárůstu, respektive poklesu, za 1 minutu při daném průtoku VE. Výsledné hodnoty koeficientů A_{OR} a A_{KA} jsou v Tab. 8.2.

Graf 8.1 Bilance hladin - VE Orlík



Graf 8.2 Bilance hladin - VE Kamýk



Tab. 8.1 Bilance hladin - ověření hodnoty koeficientu

VE	TG	hodn. koef.	rozdíl vých. a kon. hl		
		$A_{OR(h)/KA(h)}$	z HEC-RASU	z výpočtu	chyba
OR	1	0.00204	0.31	0.31	0.00
	2		0.62	0.61	0.01
	3		0.92	0.92	0.00
	4		1.22	1.23	0.01
KA	1	-0.00214	-0.19	-0.19	0.00
	2		-0.38	-0.38	0.00
	3		-0.58	-0.58	0.00
	4		-0.77	-0.77	0.00

Tab. 8.2 Bilance hladin - koeficienty rovnice

VE	$A_{OR/KA}$
OR	0.0000340
KA	-0.0000356

9 MATEMATICKÉ FUNKCE PRŮBĚHU AMPLITUD

Podoba matematických funkcí popisujících průběh kladných a záporných dynamických vln v nádrži Kamýk je popsána v kapitole 3.4 (rovnice (4)). Hodnoty koeficientů jsou stanoveny zvlášť pro rovnici popisující průběh kladných amplitud způsobených provozem VE Orlík (rovnice A), rovnici popisující průběh záporných amplitud způsobených provozem VE Orlík (rovnice B), rovnici popisující průběh kladných amplitud způsobených provozem VE Kamýk (rovnice C) a rovnici popisující průběh záporných amplitud způsobených provozem VE Kamýk (rovnice D).

9.1 Koeficient T

Perioda T je zadána jako konstantní hodnota pro danou rovnici a je stanovena na základě odečtených délek 1. až 5. periody ze simulací provedených v kapitole 6.5. Odečtené délky period jsou zaznamenány v Tab. 7.3 (délky period vlnění způsobeného provozem VE Orlík) a Tab. 7.7 (délky period vlnění způsobeného provozem VE Kamýk). Hodnota koeficientu T je tak totožná pro rovnice A a B (T_{OR}) a dále je totožná pro rovnice C a D (T_{KA}). Koeficient T_{OR} je stanoven jako průměr všech hodnot zaznamenaných v Tab. 7.3 a koeficient T_{KA} je stanoven jako průměr všech hodnot zaznamenaných v Tab. 7.7. Konečná hodnota koeficientů T_{OR} a T_{KA} a rovnice, ve kterých je hodnota aplikována, je v Tab. 9.1.

Tab. 9.1 Koeficient T

			$T_{OR/KA}$
			[s]
OR	kladná vlna	rovnice A	2958
	záporná vlna	rovnice B	
KA	kladná vlna	rovnice C	2643
	záporná vlna	rovnice D	

9.2 Koeficienty A_0 , A_1 , $-b$

Optimalizace koeficientů je provedena pomocí funkce „Řešitel“ (kapitola 4.2). Výpočet je proveden na základě známých hodnot amplitud v závislosti na výrobním režimu elektráren a periodě, ve které se amplitudy nacházejí (Tab. 7.1, Tab. 7.2, Tab. 7.5 a Tab. 7.6). Buňka cíle je definována jako suma absolutních hodnot chyb mezi známými velikostmi amplitud (odečtené se simulací v HEC-RAS) a počítanými velikostmi amplitud.

Počítaná velikost amplitudy je zadána jako:

$$A_{poč} = A_0 + A_1 x_1 e^{-b x_2}, \quad (6)$$

Kde: A_0 , A_1 , $-b$ jsou proměnné členy (optimalizované pomocí řešitele),

x_1 je výrobní režim elektrárny (zadáno jako počet TG v provozu (1-4 TG))

x_2 je perioda, ve které je počítaná amplituda (1-5).

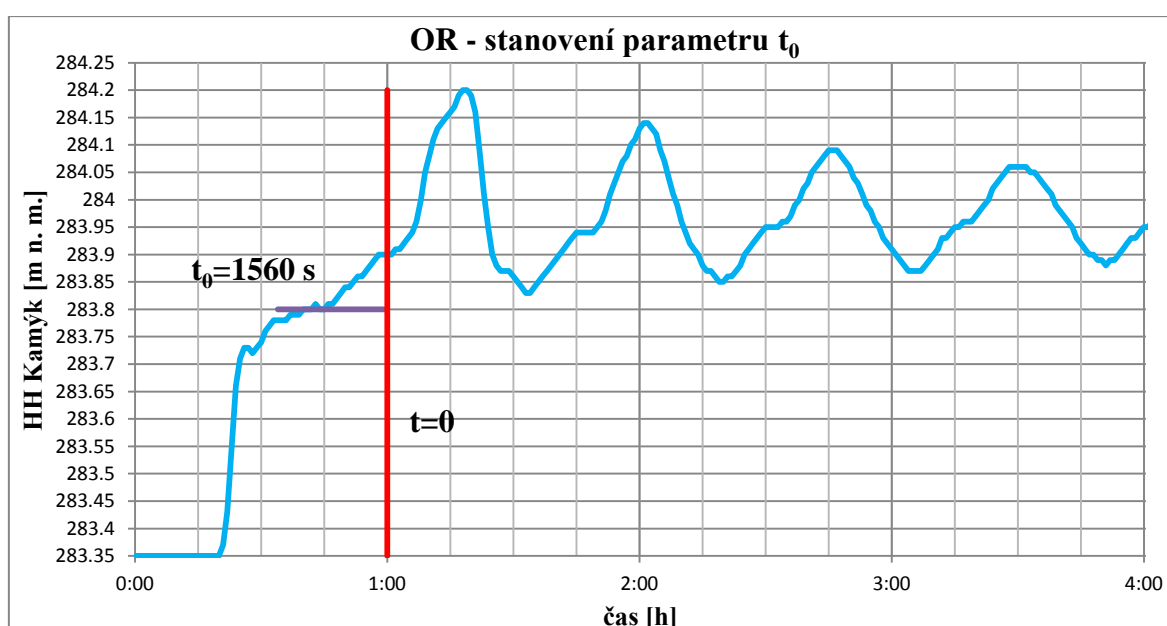
Výpočet je proveden zvlášť pro čtyři sady dat (Tab. 7.1, Tab. 7.2, Tab. 7.5 a Tab. 7.6). Vzhledem k tomu, že v konečné podobě rovnice bude výrobní režim zadáván hodnotou průtoku a ne počtem TG v provozu, je získaná hodnota koeficientu A_1 vydělena hlností jedné turbíny VE Orlík ($150 \text{ m}^3/\text{s}$) nebo VE Kamýk ($90 \text{ m}^3/\text{s}$) (kapitola 2.3). Vzhledem k tomu, že dále bude v konečné podobě rovnice čas zadáván v sekundách a ne v počtu period, je hodnota získaného parametru $-b$ vydělena délkou průměrné periody vlnění dle VE, která je v provozu (Tab. 9.1). Konečný seznam sad stanovených koeficientů a rovnice, ve kterých je sada aplikována, je v Tab. 9.2.

Tab. 9.2 Koeficienty A_0 , A_1 , $-b$

			A_0	A_1	$-b$
OR	kladná vlna	rovnice A	0.06082	0.00093	-0.00020
	záporná vlna	rovnice B	0.04000	0.00042	-0.00011
KA	kladná vlna	rovnice C	0.01663	0.00023	-0.00007
	záporná vlna	rovnice D	0.02522	0.00044	-0.00014

9.3 Koeficient t_0

Graf 9.1 Koeficient t_0



Koeficient t_0 reprezentuje zpoždění informace o změně provozního režimu VE Orlík v profilu VD Kamýk. Z tohoto popisu vyplývá, že t_0 nabývá nenulové hodnoty pouze v rovnicích, které popisují průběh amplitud způsobené provozem VE Orlík. Jakékoliv změny v provozu VE Kamýk jsou totiž okamžitě zřetelné na průběhu amplitud v profilu VD Kamýk. Způsob stanovení koeficientu t_0 je znázorněn v Grafu 9.1. Hodnoty koeficientu a rovnice, ve kterých je daná hodnota aplikována, jsou v Tab. 9.3.

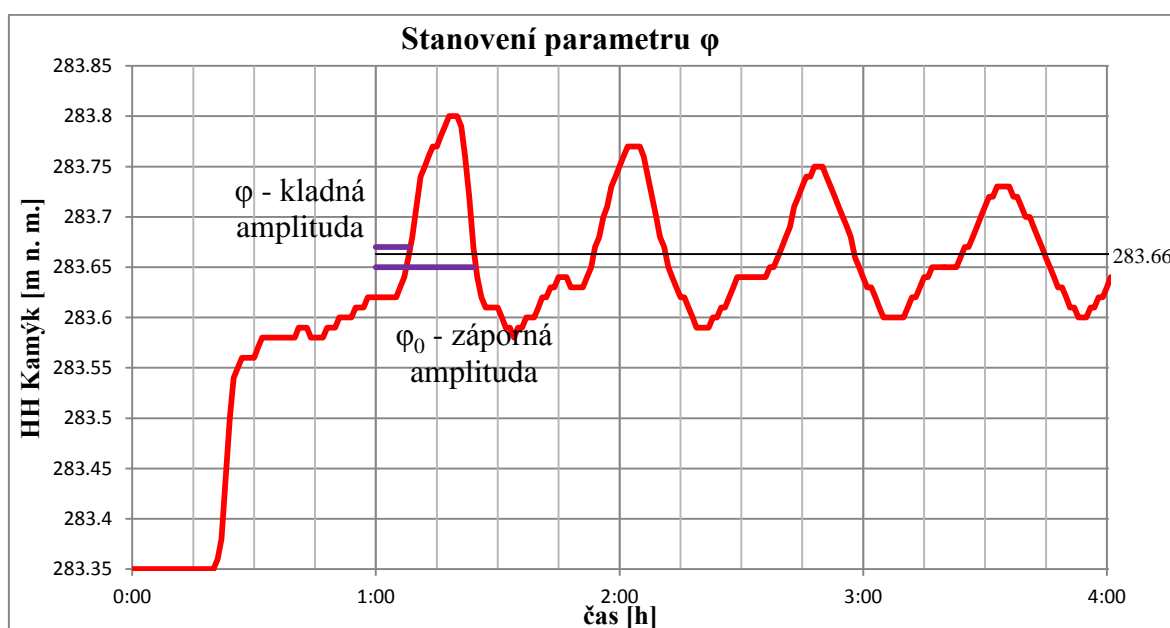
Tab. 9.3 Koeficient t_0

			t_0 [s]
OR	kladná vlna	rovnice A	1560
	záporná vlna	rovnice B	1560
KA	kladná vlna	rovnice C	0
	záporná vlna	rovnice D	0

9.4 Koeficient φ

Koeficient φ reprezentuje fázový posun dynamické vlny od nulového bodu. Nulový bod ($t=0$) je okamžik vypnutí VE (kapitola 3.4). Hodnota koeficientu φ je stanovena zvlášť pro rovnice A-D. Způsob jakým je hodnota koeficientu stanovena pro rovnice popisující kladné amplitudy a rovnice popisující záporné amplitudy je znázorněn v Grafu 9.2. Hodnoty koeficientů jsou stanoveny na základě výsledků z provedených simulací (Graf 6.11 a Graf 6.12) a jsou zaznamenány, spolu s rovnicí, ve které je daná hodnota aplikována, v Tab. 9.4.

Graf 9.2 Stanovení koeficientu φ



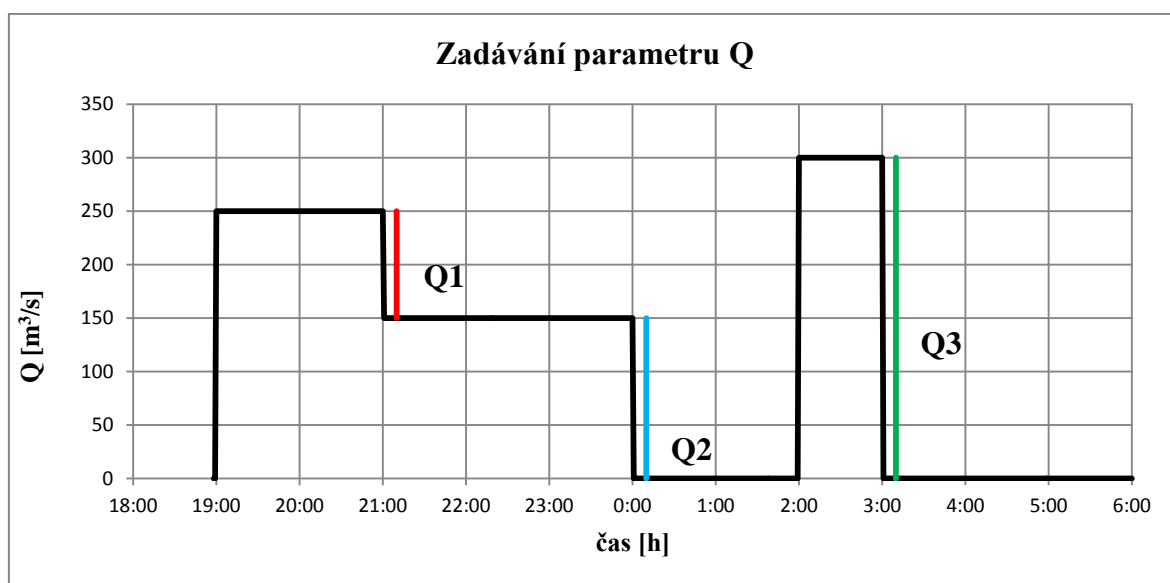
Tab. 9.4 Koeficient φ

			φ
			[s]
OR	kladná vlna	rovnice A	-480
	záporná vlna	rovnice B	-1440
KA	kladná vlna	rovnice C	-120
	záporná vlna	rovnice D	-2040

9.5 Parametr Q

Parametr Q reprezentuje výrobní režim vodní elektrárny. Způsob zadávání parametru Q je znázorněn v Grafu 9.3, kde je černou linkou znázorněn příklad výrobního režimu VE. Pro každou hodnotu Q1 až Q3 (červená, modrá a zelená linka) je vždy počítán samostatný průběh amplitud a jednotlivé příspěvky jsou sečteny.

Graf 9.3 Parametr Q



9.6 Proměnná t

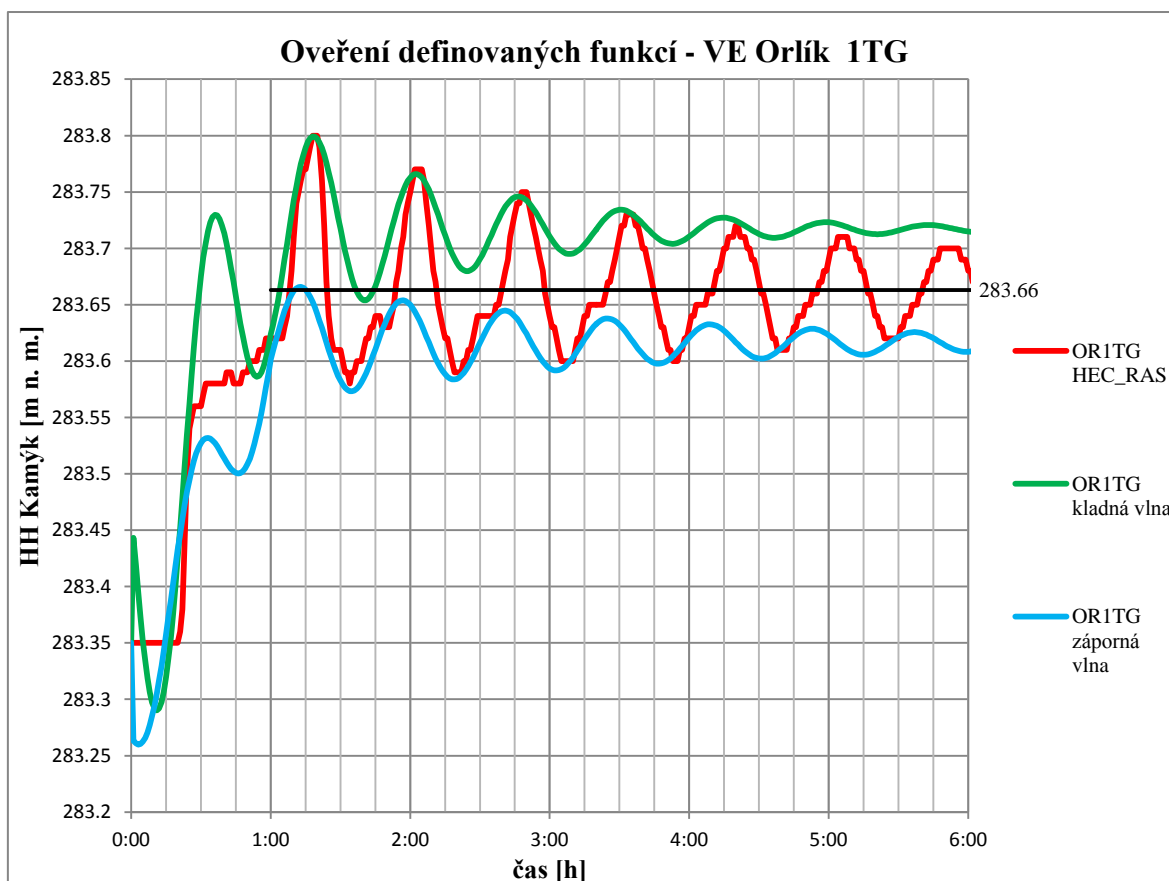
Proměnnou v definovaných rovnicích je čas t . Čas $t=0$ odpovídá momentu ukončení provozu té vodní elektrárny, pro jejíž provoz je rovnice odvozena. Pro rovnice A a B tak čas $t=0$ odpovídá momentu ukončení provozu VE Orlik a pro rovnice C a D momentu ukončení VE Kamýk. Pro každou hodnotu Q (kapitola 9.5) je definován příslušný čas $t=0$ (okamžik ukončení daného provozu).

9.7 Ověření správnosti definovaných funkcí

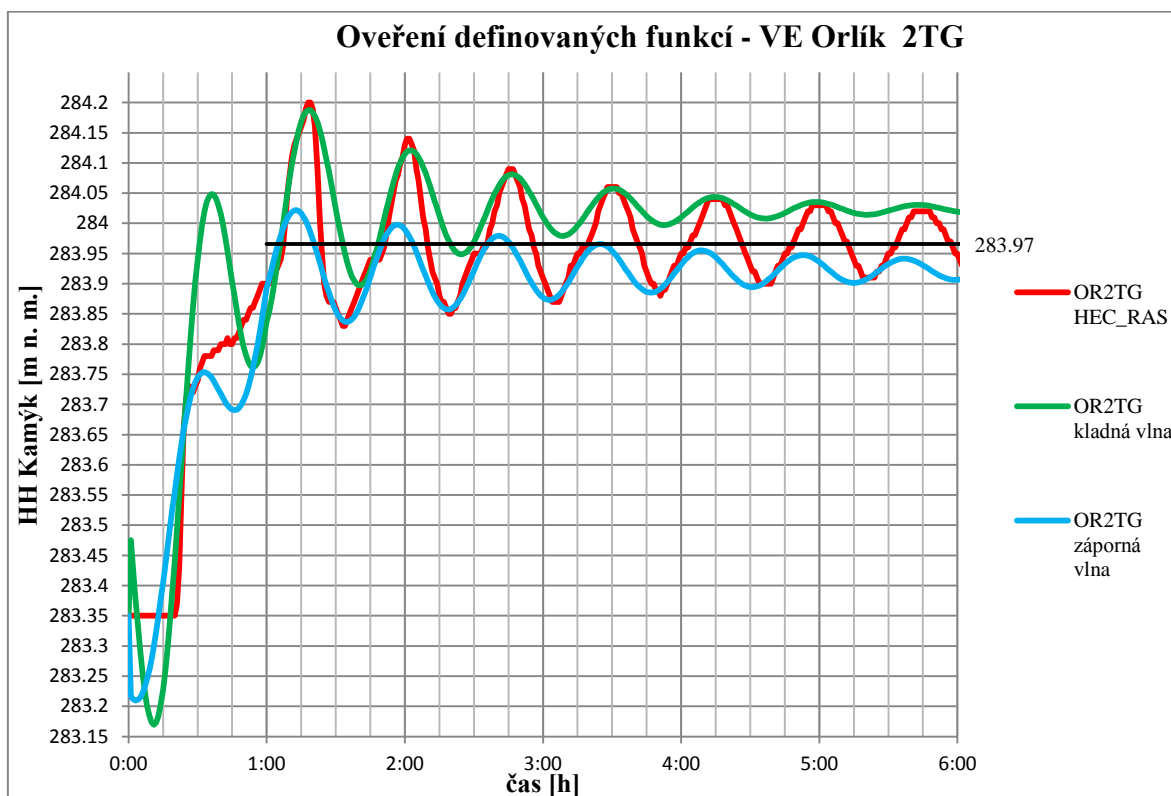
Ověření správnosti definovaných funkcí je provedeno porovnáním průběhu kladných a záporných amplitud ze simulací s průběhem vypočteným pomocí rovnic A-D. K ověření

jsou využity simulace, na základě kterých jsou odvozeny vlastnosti dynamických vln a jsou sestaveny rovnice A-D (Graf 6.11 a Graf 6.12). Na Grafu 9.4 až Grafu 9.7 jsou ověřeny rovnice A a B, tedy rovnice popisující vliv provozu VE Orlík na průběh kladných a záporných amplitud. Červená linka znázorňuje průběh hladiny vycházející z matematické simulace, zelená linka znázorňuje výpočet kladných amplitud (aplikace rovnice A) a modrá linka znázorňuje výpočet záporných amplitud (aplikace rovnice B). Na Grafu 9.8 až Grafu 9.11 jsou ověřeny rovnice C a D, tedy rovnice popisující vliv provozu VE Kamýk na průběh kladných a záporných amplitud. Červená linka znázorňuje průběh hladiny vycházející z matematické simulace, zelená linka znázorňuje výpočet kladných amplitud (aplikace rovnice C) a modrá linka znázorňuje výpočet záporných amplitud (aplikace rovnice D).

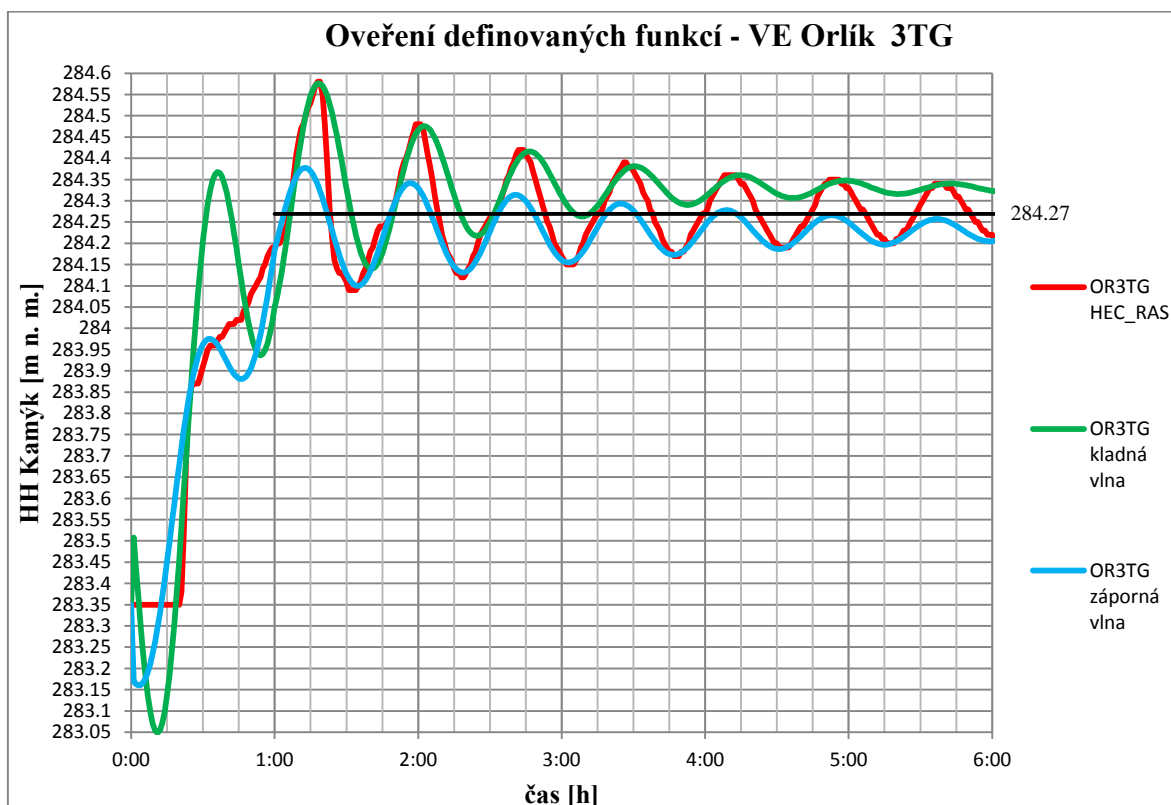
Graf 9.4 Ověření rovnice A a B - VE Orlík 1TG



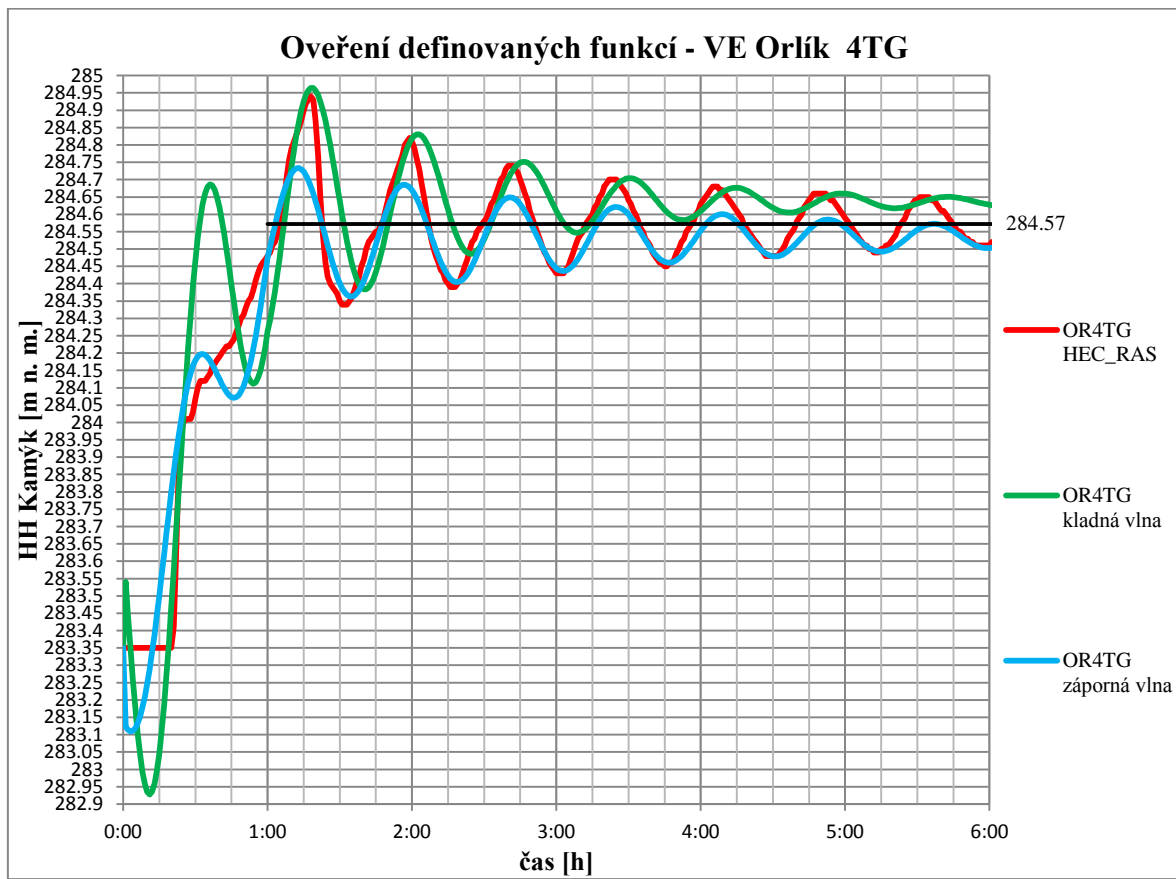
Graf 9.5 Ověření rovnice A a B - VE Orlík 2TG



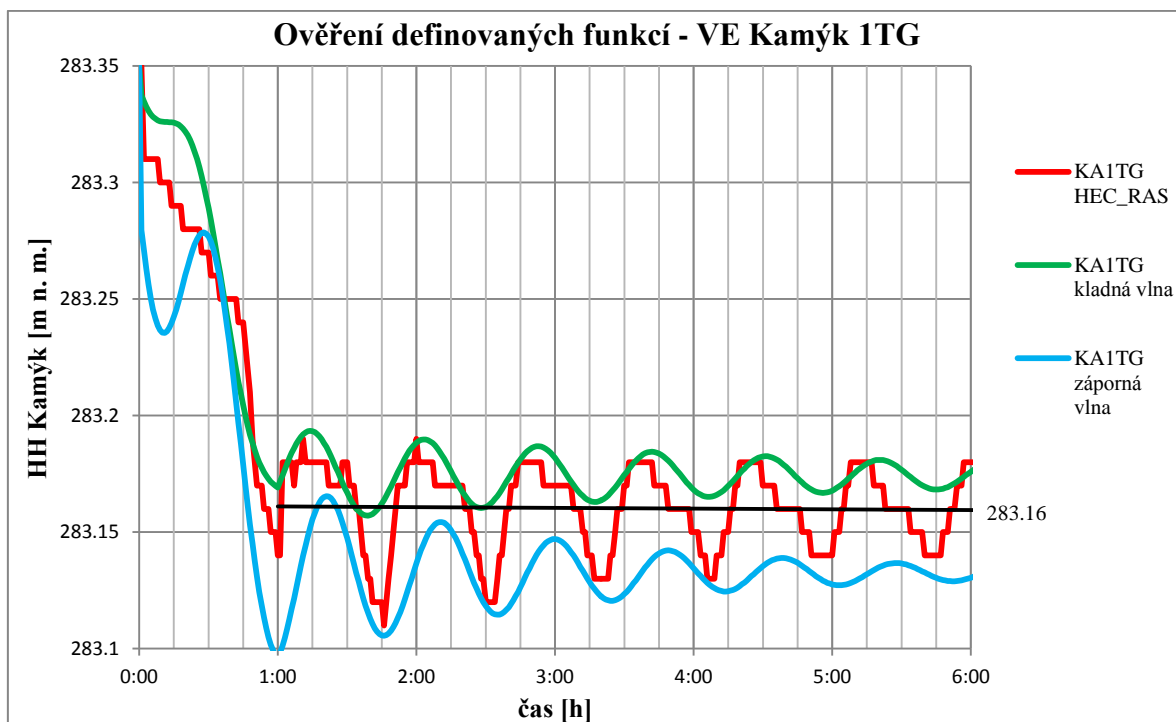
Graf 9.6 Ověření rovnice A a B - VE Orlík 3 TG



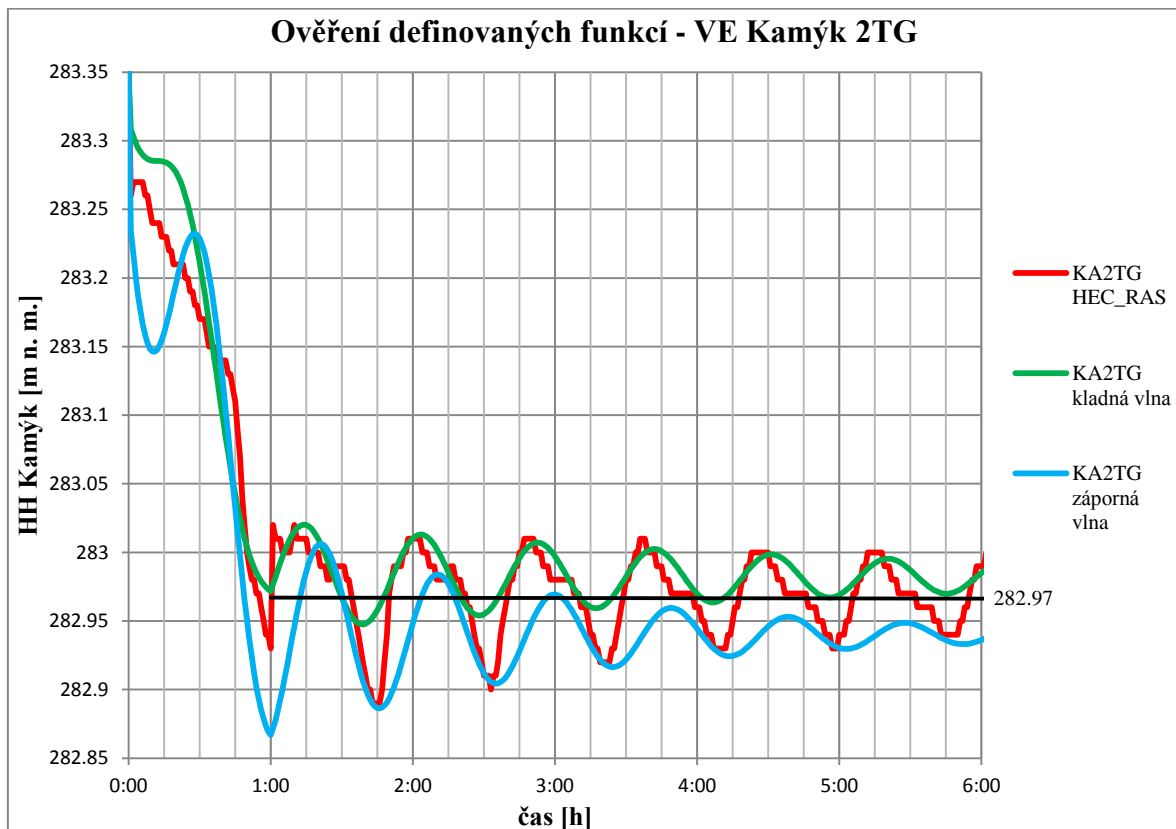
Graf 9.7 Ověření rovnice A a B - VE Orlík 4TG



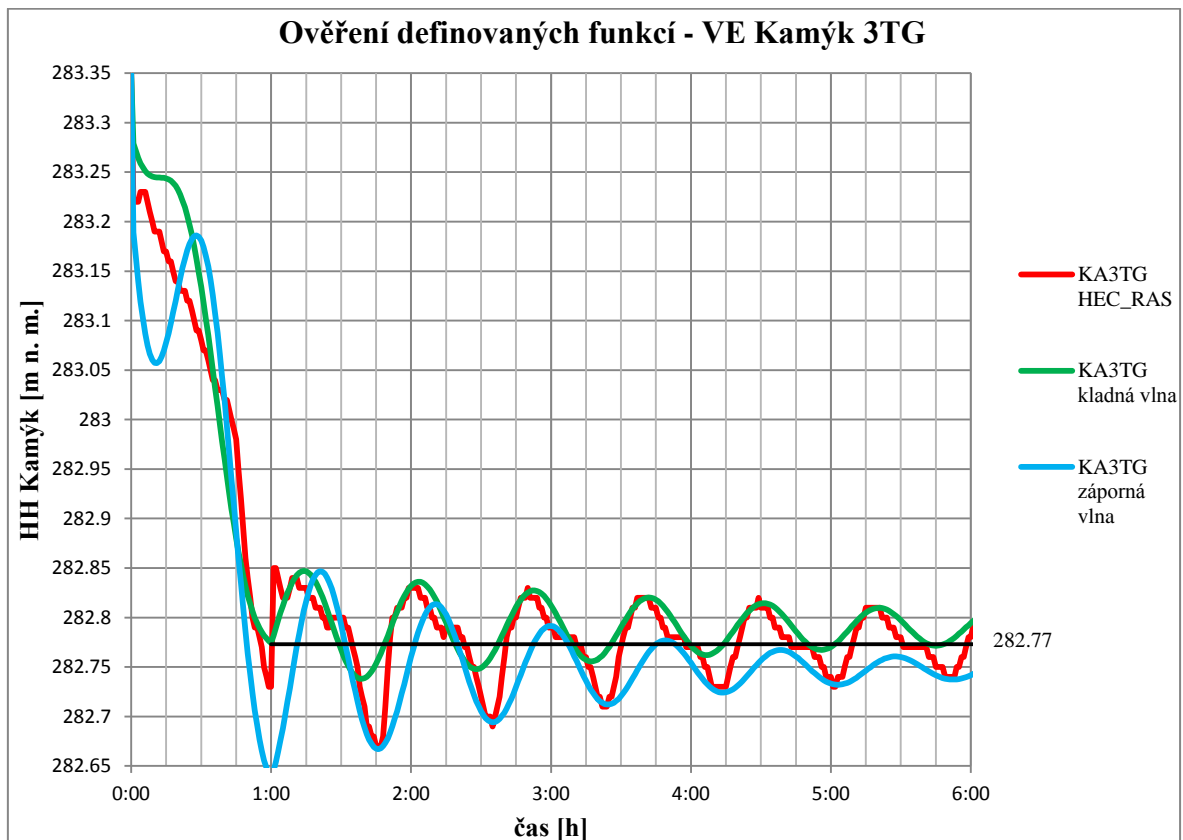
Graf 9.8 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 1TG



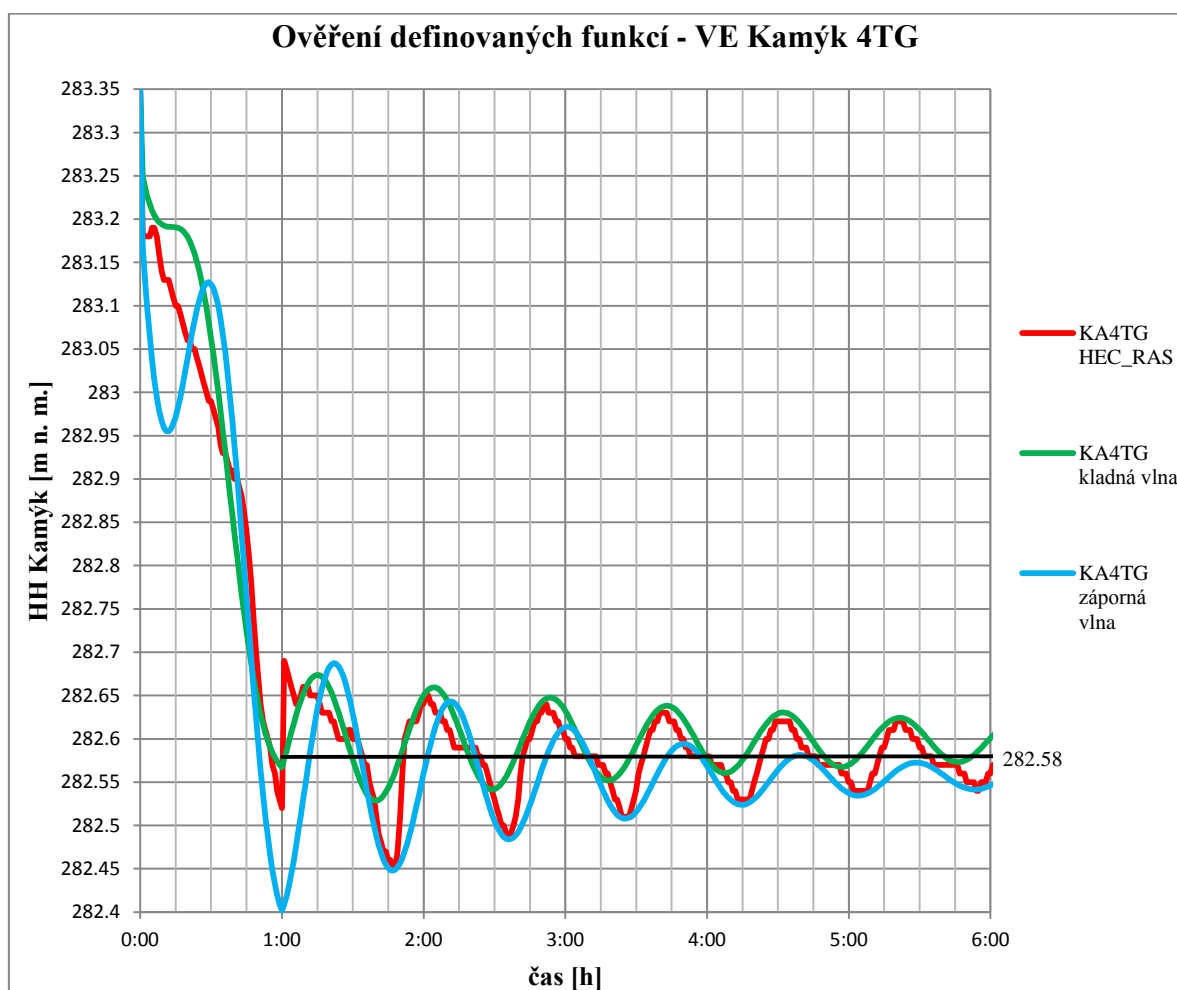
Graf 9.9 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 2TG



Graf 9.10 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 3TG



Graf 9.11 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 4TG



V Tab. 9.5 až Tab. 9.8 je provedeno zhodnocení přesnosti výpočtu rovnic A-D. Vždy je stanovena kóta hladiny v amplitudě v dané periodě (1-5) pro daný výrobní režim elektrárny (1-4 TG) z provedené simulace a z výpočtu a je stanoven jejich rozdíl. Dále je stanovena hodina, ve které je amplituda dosažena. Hodina 1 odpovídá 1. hodině po ukončení provozu VE (od času $t=0$). Pro provozovatele elektráren je podstatné, aby výpočtem stanovená amplituda byla dosažena ve stejné hodině jako amplituda vycházející ze simulace. Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v hodnotě kóty hladiny v amplitudě je 0,02 m. Dále z výsledků vyplývá, že v případě provozu 4TG na VE Orlik je kladná amplituda ve 2. periodě dosažena dle simulace v 1. hodině a dle výpočtu ve 2. hodině. Z Grafu 9.7, kde je diskutovaný problém znázorněn, je patrné, že vypočtený průběh kladné amplitudy ve 2. periodě v čase, kdy nastává amplituda dle výsledků ze simulace, je téměř totožný, a proto je i tento výsledek uspokojující.

Tab. 9.5 Ověření rovnice A - kladná amplituda - VE Orlik

TG	perioda		1	2	3	4	5	
1	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.80	283.77	283.75	283.73	283.72
			výpočet	283.80	283.77	283.75	283.73	283.73
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
2	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	284.20	284.14	284.09	284.06	284.04
			výpočet	284.19	284.12	284.08	284.06	284.04
	rozdíl	[m]	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
3	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	284.58	284.48	284.42	284.39	284.36
			výpočet	284.58	284.48	284.42	284.38	284.36
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
4	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	284.94	284.82	284.74	284.70	284.68
			výpočet	284.96	284.83	284.75	284.70	284.68
	rozdíl	[m]	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	1	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	

Tab. 9.6 Ověření rovnice B - záporná amplituda - VE Orlik

TG	perioda		1	2	3	4	5	
1	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.58	283.59	283.60	283.60	283.61
			výpočet	283.57	283.58	283.59	283.60	283.60
	rozdíl	[m]		-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
výpočet			1	2	3	3	4	
2	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.83	283.85	283.87	283.88	283.90
			výpočet	283.84	283.86	283.87	283.89	283.89
	rozdíl	[m]		0.01	0.01	0.00	0.01	-0.01
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
výpočet			1	2	3	3	4	
3	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	284.09	284.12	284.15	284.17	284.19
			výpočet	284.10	284.13	284.15	284.17	284.19
	rozdíl	[m]		0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
výpočet			1	2	3	3	4	
4	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	284.34	284.39	284.43	284.45	284.48
			výpočet	284.36	284.40	284.44	284.46	284.48
	rozdíl	[m]		0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
výpočet			1	2	3	3	4	

Tab. 9.7 Ověření rovnice C - kladná amplituda - VE Kamýk

TG	perioda		1	2	3	4	5	
1	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.19	283.19	283.18	283.18	283.18
			výpočet	283.19	283.19	283.18	283.18	283.18
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
2	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.02	283.01	283.01	283.01	283.00
			výpočet	283.02	283.01	283.01	283.00	283.00
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
3	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	282.84	282.83	282.83	282.82	282.82
			výpočet	282.85	282.84	282.83	282.82	282.81
	rozdíl	[m]	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
4	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	282.69	282.65	282.64	282.63	282.62
			výpočet	282.67	282.66	282.65	282.64	282.63
	rozdíl	[m]	-0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	

Tab. 9.8 Ověření rovnice D - záporné amplitudy - VE Kamýk

TG	perioda		1	2	3	4	5	
1	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.11	283.12	283.13	283.13	283.14
			výpočet	283.11	283.11	283.12	283.12	283.13
	rozdíl	[m]	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	4	4
výpočet			1	2	3	4	4	
2	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	282.89	282.90	282.92	282.93	282.93
			výpočet	282.89	282.90	282.92	282.92	282.93
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	4	4
výpočet			1	2	3	4	4	
3	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	282.67	282.69	282.71	282.72	282.73
			výpočet	282.67	282.69	282.71	282.72	282.73
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	4	5
výpočet			1	2	3	4	5	
4	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	282.45	282.49	282.51	282.53	282.54
			výpočet	282.45	282.48	282.51	282.53	282.54
	rozdíl	[m]	0.00	-0.01	0.00	0.00	00.00	
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	4	5
výpočet			1	2	3	4	5	

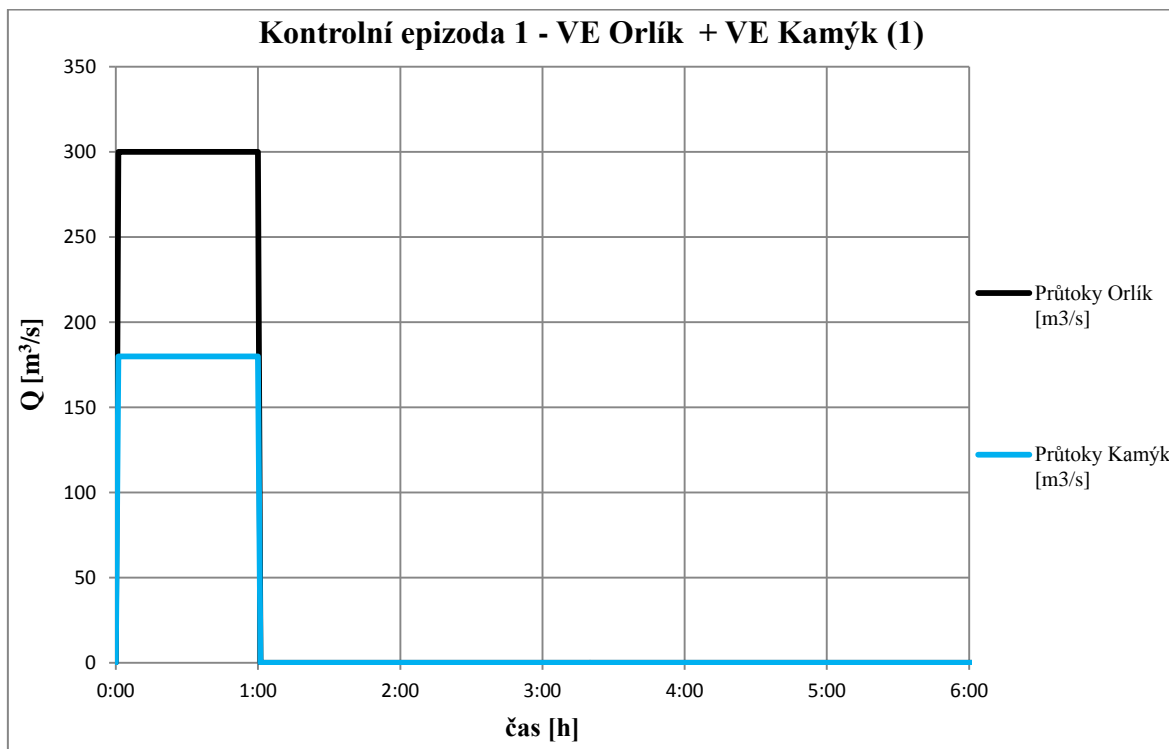
10 KONTROLNÍ VÝPOČTY

Kontrolní výpočty průběhu kladných a záporných amplitud dynamických vln jsou provedeny pro kontrolní epizody. Výsledky výpočtu jsou porovnány s průběhem dynamických vln daným měřeními daty nebo výstupem z matematického modelu.

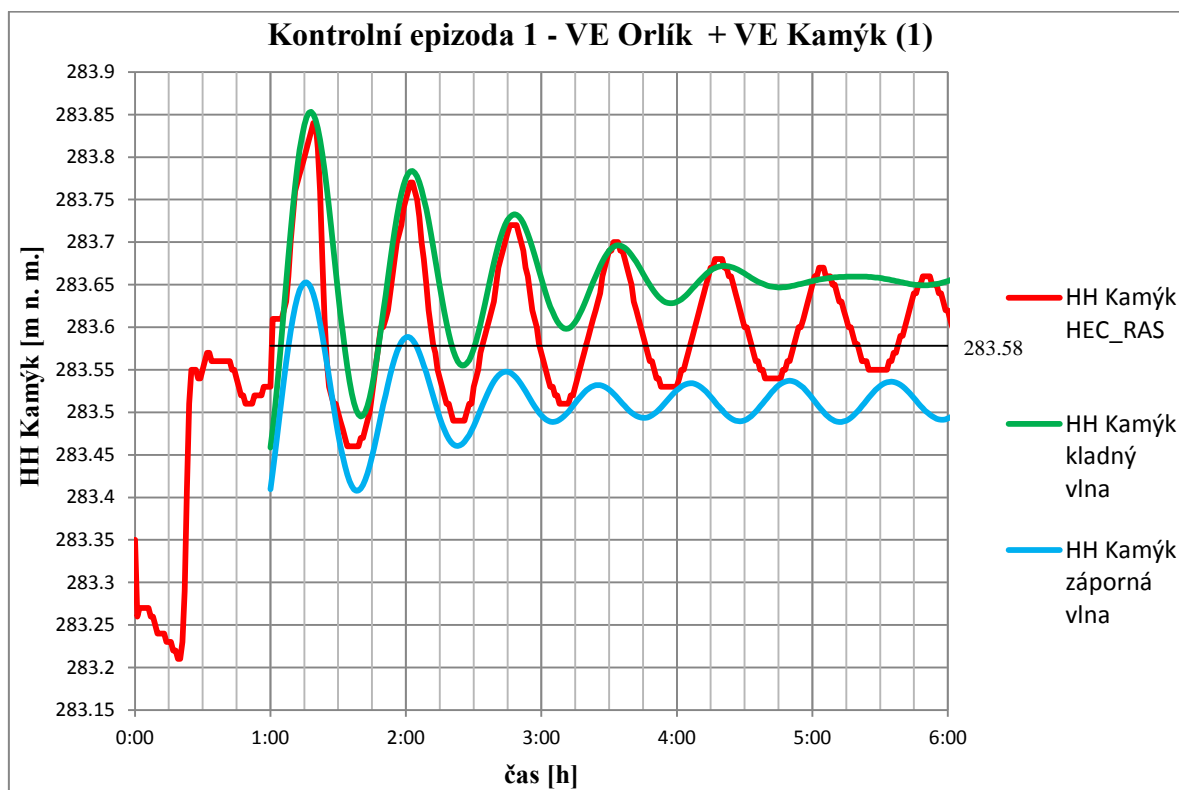
10.1 Kontrolní epizoda 1 – VE Orlík + VE Kamýk (1)

Výrobní režimy vodních elektráren při kontrolní epizodě 1 jsou znázorněny v Grafu 10.1. Tato epizoda není převzata z reálných měření (kapitola 2.1), a proto je nutné simulovat epizodu v matematickém modelu, aby byl získán průběh dynamických vln v profilu VD Kamýk. Okrajové podmínky jsou zadány jako výrobní režimy elektráren (Graf 10.1) a počáteční podmínka (počáteční hladina v nádrži) je zadána hodnotou 283,35 m n. m (kapitola 6.4). Výsledek simulace, v podobě průběhu hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk), je znázorněn v Grafu 10.2 červenou linkou. Současně je proveden výpočet průběhu kladných a záporných amplitud tak, jak je popsán v kapitolách 3.3 a 3.4. Hodnoty koeficientů rovnic jsou stanoveny v kapitolách 9.1 až 9.6. V Grafu 10.2 je zelenou linkou znázorněn vypočítaný průběh kladných amplitud a modrou linkou průběh amplitud záporných.

Graf 10.1 Kontrolní epizoda 1 - průtoky



Graf 10.2 Kontrolní epizoda 1 - průběh hladiny



V Tab. 10.1 je provedeno zhodnocení výpočtu dle metodiky, která je popsána v kapitole 9.7 (strana 59). Hodina 1 odpovídá 1. hodině po ukončení provozu vodních elektráren. Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v hodnotě kóty v kladné amplitudě je 0,01 m a v záporné amplitudě 0,05 m. Všechny amplitudy jsou dle výpočtu dosaženy ve stejné hodině, v jaké jsou dosaženy dle výsledku ze simulace.

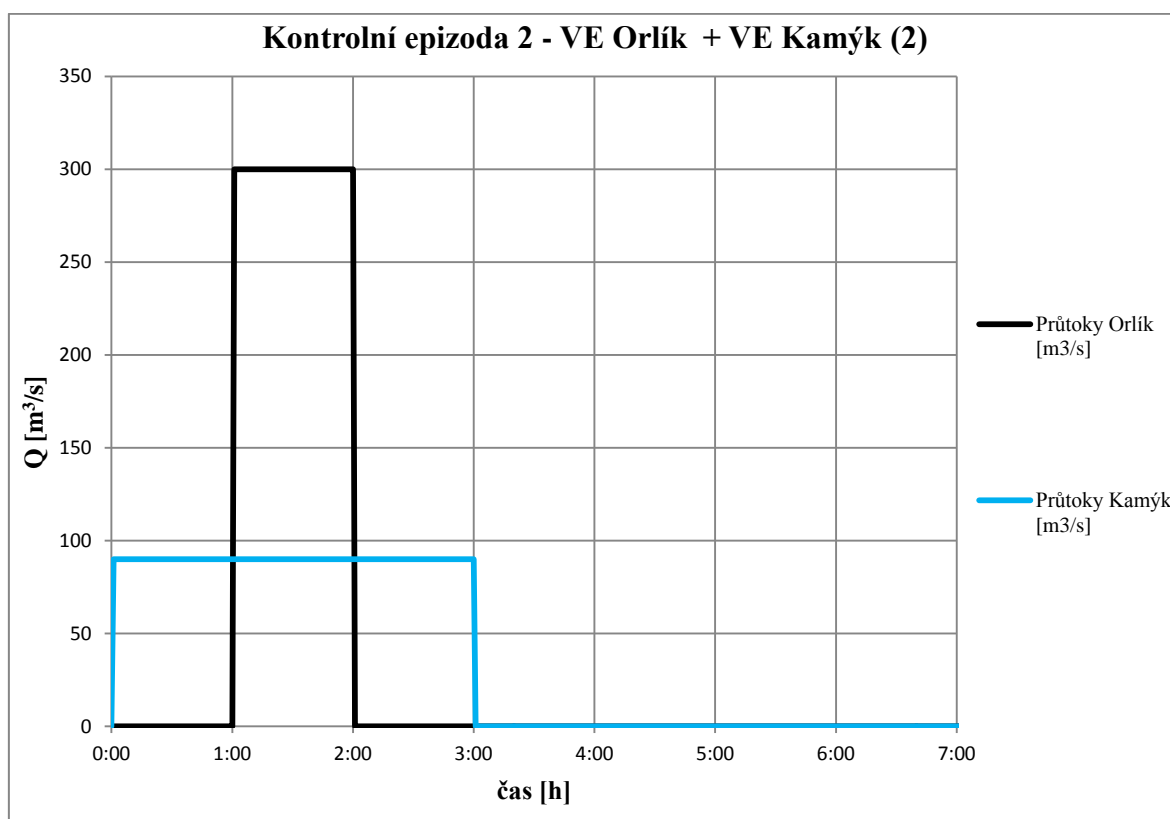
Tab. 10.1 Kontrolní epizoda 1 - vyhodnocení

perioda			1	2	3	4	5	
kladná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.84	283.77	283.72	283.70	283.68
			výpočet	283.85	283.78	283.73	283.70	283.67
	rozdíl	[m]		0.01	0.01	0.01	0.00	-0.01
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
		výpočet	1	2	2	3	4	
záporná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.46	283.49	283.51	283.53	283.54
			výpočet	283.41	283.46	283.49	283.49	283.49
	rozdíl	[m]		-0.05	-0.03	-0.02	-0.04	-0.05
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
		výpočet	1	2	3	3	4	

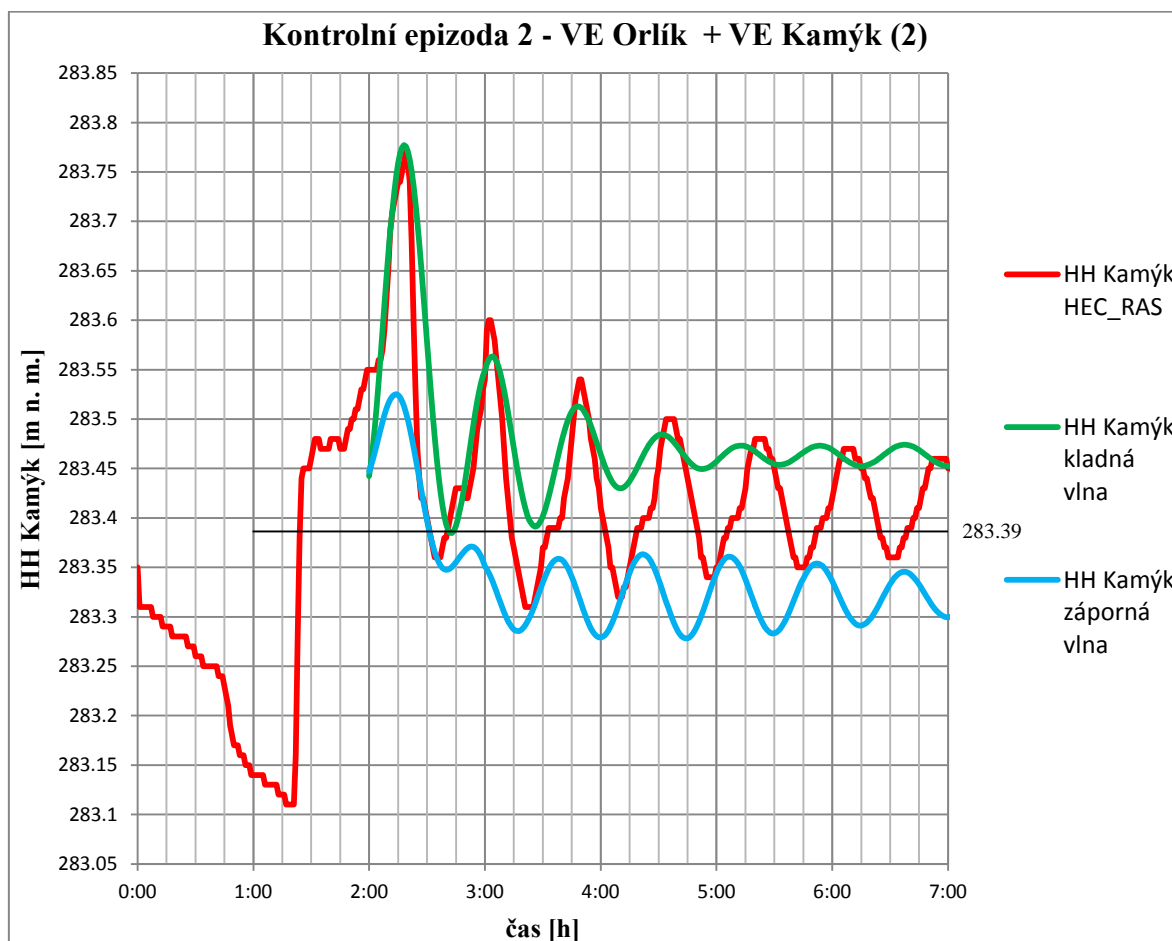
10.2 Kontrolní epizoda 2 – VE Orlík + VE Kamýk (2)

Výrobní režimy při kontrolní epizodě 2 jsou znázorněny v Grafu 10.3. Tato kontrolní epizoda nevychází, stejně jako kontrolní epizoda 1, z měřených dat. Stanovený režim průtoku vodními elektrárnami ovšem kopíruje typický průběh reálných výrobních režimů (kapitola 2.1). Z VN Kamýk je nejprve upouštěn jistý objem vody skrz VE Kamýk, poté je spuštěna výroba na VE Orlík. Po vypnutí VE Orlík je dále vypouštěna voda z VN Kamýk skrz VE Kamýk. Průběh hladiny v profilu VD Kamýk stanovený simulací epizody v matematickém modelu je znázorněn v Grafu 10.4 červenou linkou. Současně je proveden výpočet průběhu kladných a záporných amplitud tak, jak je popsán v kapitolách 3.3 a 3.4. Hodnoty koeficientů rovnic jsou stanoveny v kapitolách 9.1 až 9.6. V Grafu 10.4 je zelenou linkou znázorněn vypočítaný průběh kladných amplitud a modrou linkou průběh amplitud záporných.

Graf 10.3 Kontrolní epizoda 2 - průtoky



Graf 10.4 Kontrolní epizoda 2 - průběh hladiny



V Tab. 10.2 je provedeno zhodnocení výpočtu dle metodiky, která je popsána v kapitole 9.7 (strana 59). Hodina 1 odpovídá 1. hodině po ukončení provozu VE Orlík. Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v hodnotě kóty v kladné amplitudě je 0,04 m a v záporné amplitudě 0,07 m. Všechny amplitudy jsou dle výpočtu dosaženy ve stejné hodině, v jaké jsou dosaženy dle výsledku ze simulace.

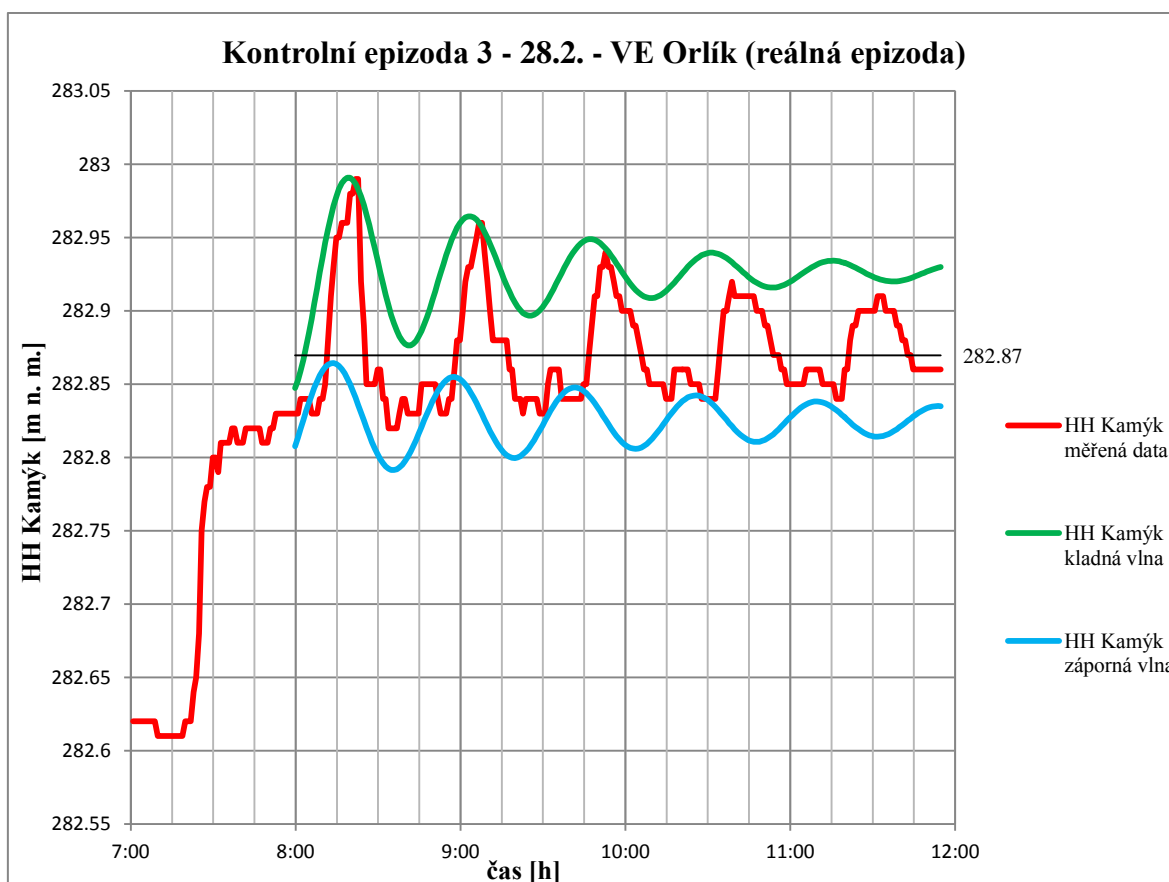
Tab. 10.2 Kontrolní epizoda 2 - vyhodnocení

perioda			1	2	3	4	5	
kladná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.77	283.60	283.54	283.50	283.48
			výpočet	283.78	283.56	283.51	283.48	283.47
	rozdíl	[m]		0.01	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01
	hodina		HEC-RAS	1	2	2	3	4
			výpočet	1	2	2	3	4
záporná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	HEC-RAS	283.36	283.31	283.32	283.34	283.35
			výpočet	283.35	283.29	283.28	283.28	283.28
	rozdíl	[m]		-0.01	-0.02	-0.04	-0.06	-0.07
	hodina		HEC-RAS	1	2	3	3	4
			výpočet	1	2	3	3	4

10.3 Kontrolní epizoda 3 – 28.2. – VE Orlík

Kontrolní epizoda 3 je totožná s kalibrační epizodou matematického modelu. V provozu je pouze VE Orlík a její výrobní režim je znázorněn v Grafu 6.1. Měřený průběh hladiny v profilu VD Kamýk je znázorněn v Grafu 10.5 červenou linkou. Současně je proveden výpočet průběhu kladných a záporných amplitud tak, jak je popsán v kapitolách 3.3 a 3.4. Hodnoty koeficientů rovnic jsou stanoveny v kapitolách 9.1 až 9.6. V Grafu 10.5 je zelenou linkou znázorněn vypočítaný průběh kladných amplitud a modrou linkou průběh amplitud záporných.

Graf 10.5 Kontrolní epizoda 3 - průběh hladiny



V Tab. 10.3 je provedeno zhodnocení výpočtu dle metodiky, která je popsána v kapitole 9.7 (strana 59). Hodina 1 odpovídá 1. hodině po ukončení provozu VE Orlík. Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v hodnotě kóty v kladné amplitudě je 0,02 m a v záporné amplitudě 0,03 m. Všechny kladné amplitudy a záporné amplitudy 1. až 3. periody jsou dle výpočtu dosaženy ve stejné hodině, v jaké jsou dosaženy dle měřených dat. Záporná amplituda 4. periody je dle měření dosažena ve 4. hodině po ukončení provozu VE Orlík a dle výpočtu v hodině 3.

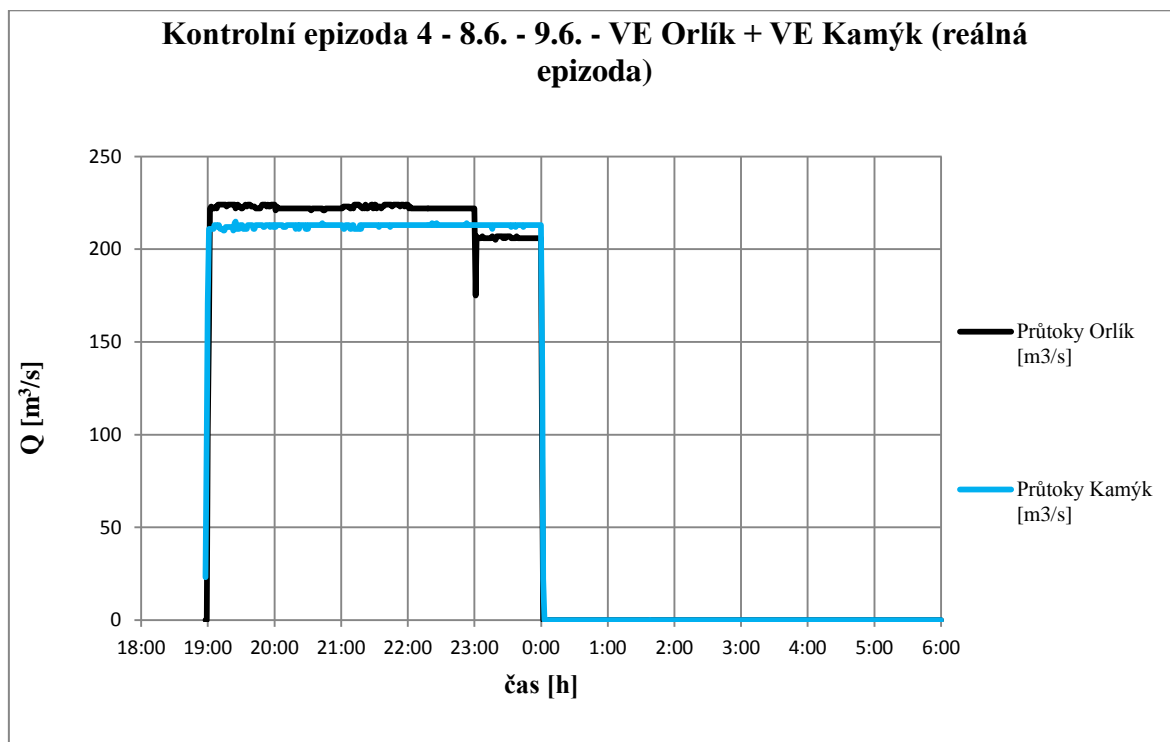
Tab. 10.3 Kontrolní epizoda 3 - vyhodnocení

perioda			1	2	3	4	5
kladná vlna	kóta hladiny v amplitudě [m n. m.]	měřené	282.99	282.96	282.94	282.92	282.91
		výpočet	282.99	282.96	282.95	282.94	282.93
	rozdíl	[m]	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
	hodina	měřené	1	2	2	3	4
výpočet		1	2	2	3	4	
záporná vlna	kóta hladiny v amplitudě [m n. m.]	měřené	282.82	282.83	282.84	282.84	
		výpočet	282.79	282.80	282.81	282.81	
	rozdíl	[m]	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	
	hodina	měřené	1	2	3	4	
výpočet		1	2	3	3		

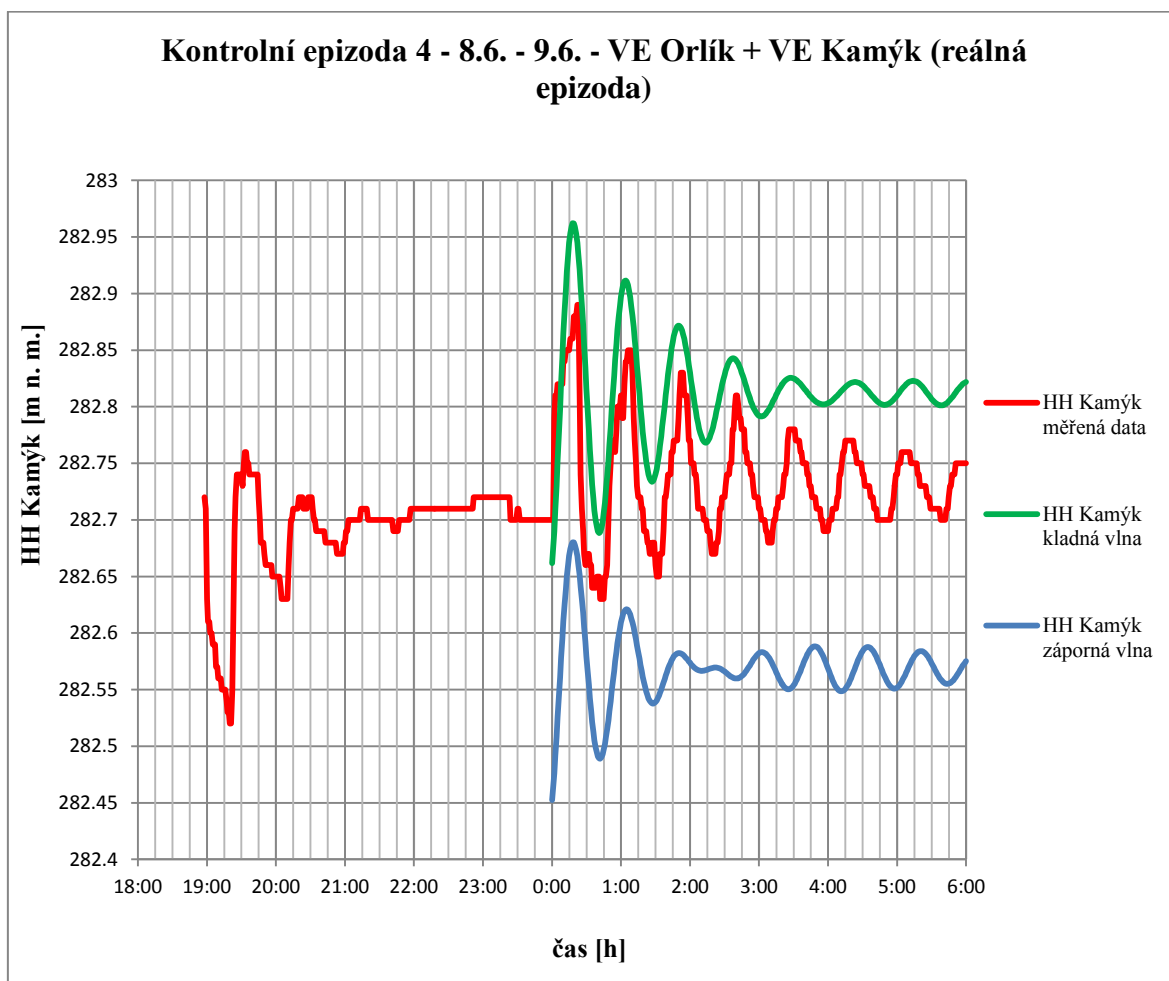
10.4 Kontrolní epizoda 4 – 7.3. – VE Orlík + VE Kamýk

Kontrolní epizoda 4 vychází z reálných měření a výrobní režimy elektráren jsou znázorněny v Grafu 10.6. Měřený průběh hladiny v profilu VD Kamýk je znázorněn v Grafu 10.7 červenou linkou. Současně je proveden výpočet průběhu kladných a záporných amplitud tak, jak je popsán v kapitolách 3.3 a 3.4. Hodnoty koeficientů rovnic jsou stanoveny v kapitolách 9.1 až 9.6. V tomto výpočtu je aplikována metoda skládání vln při změnách průtoku na jedné VE (kapitola 9.5). V Grafu 10.7 je zelenou linkou znázorněn vypočítaný průběh kladných amplitud a modrou linkou průběh amplitud záporných.

Graf 10.6 Kontrolní epizoda 4 - průtoky



Graf 10.7 Kontrolní epizoda 4 - průběh hladiny



V Tab. 10.4 je provedeno zhodnocení výpočtu dle metodiky, která je popsána v kapitole 9.7 (strana 59). Hodina1 odpovídá 1. hodině po ukončení provozu vodních elektráren. Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v hodnotě kóty v kladné amplitudě je 0,07 m a v záporné amplitudě 0,14 m. Všechny kladné amplitudy a záporné amplitudy 1., 2., 3. a 5. periody jsou dle výpočtu dosaženy ve stejné hodině, v jaké jsou dosaženy dle měřených dat. Záporná amplituda 4. periody je dle měření dosažena ve 4. hodině po ukončení provozu VE Orlík a dle výpočtu v hodině 3.

Tab. 10.4 Kontrolní epizoda 4 - vyhodnocení

perioda				1	2	3	4	5
kladná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	měřené	282.89	282.85	282.83	282.81	282.78
			výpočet	282.96	282.91	282.87	282.84	282.83
	rozdíl	[m]	0.07	0.06	0.04	0.03	0.05	
	hodina*		měřené	1	2	2	3	4
výpočet			1	2	2	3	4	
záporná vlna	kóta hladiny v amplitudě	[m n. m.]	měřené	282.63	282.65	282.67	282.68	282.69
			výpočet	282.49	282.53	282.57	282.56	282.55
	rozdíl	[m]	-0.14	-0.12	-0.10	-0.12	-0.14	
	hodina*		měřené	1	2	3	4	4
výpočet			1	2	3	3	4	

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V kapitole 6 je popsáno sestavení matematického modelu v SW HEC-RAS pro výpočet neustáleného proudění v nádrži Kamýk, které je způsobené provozními režimy VE Orlík a VE Kamýk. Výsledky dosažené v kapitole 6.3 prokazují, že sestavený model dobře reprezentuje realitu a poznatky, které jsou jeho pomocí získány (vlastnosti dynamických vln v závislosti na provozu VE Orlík a VE Kamýk – kapitola 7), lze považovat za správné.

V kapitole 3.4 je formulován tvar matematická funkce, která je využita pro stanovení průběhu kladných a záporných amplitud v čase v profilu VD Kamýk. V kapitolách 9.1 až 9.6 jsou potom definovány jednotlivé členy funkcí, jež popisují průběh kladných amplitud způsobených provozem VE Orlík (rovnice A), průběh záporných amplitud způsobených provozem VE Orlík (rovnice B), průběh kladných amplitud způsobených provozem VE Kamýk (rovnice C) a průběh záporných amplitud způsobených provozem VE Kamýk (rovnice D). V kapitole 9.7 je prokázáno, že zpětný výpočet velikostí amplitud pro simulace, na základě jejichž výsledků jsou odvozeny koeficienty rovnic, umožní stanovit velikosti amplitud a jejich načasování s vysokou přesností. Maximální rozdíl v hodnotě kóty hladiny v amplitudě je 0,02 m (Tab. 9.5 až Tab. 9.8). Hodnoty rozdílů se tak pohybují na hranici přesnosti měření hladiny. Všechny vypočítané amplitudy, kromě kladné amplitudy ve 2. periodě v případě provozu 4 TG na VE Orlík, jsou dosaženy ve stejné hodině po ukončení provozu vodních elektráren, v jaké jsou dosaženy dle výsledků ze simulací. Průběh kladné amplitudy ve 2. periodě v případě provozu 4 TG na VE Orlík je znázorněn v Grafu 9.7. Zde je patrné, že vypočtený průběh kladné amplitudy ve 2. periodě v čase, kdy nastává amplituda dle výsledků ze simulace, je téměř totožný, a proto je i tento výsledek uspokojivý. Správnost definovaných funkcí je v tomto stádiu výzkumu prokázána pro případy provozu vodních elektráren, na jejichž základě byly stanoveny koeficienty funkcí a kdy je v provozu vždy pouze jedna VE.

V další fázi výzkumu je ověřena použitelnost matematických funkcí pro epizody, kdy jejich jednotlivé výstupy (vlastnosti průběhu amplitud v profilu VD Kamýk) neovlivnily definované koeficienty rovnic.

V první řadě jsou testovány dvě kontrolní epizody, kdy jsou v provozu obě vodní elektrárny (kapitola 10.1 a 10.2). Epizody nevycházejí z měřených dat, a proto jsou výsledky výpočtu porovnány s výstupem ze simulací v matematickém modelu. Z výsledků, jež jsou zobrazeny v Grafu 10.2 a Grafu 10.4, je patrné, že průběh kladných amplitud daný

výpočtem velmi dobře kopíruje jejich průběh, který je daný výstupem ze simulace. Maximální rozdíl v hodnotách kót hladiny v kladných amplitudách je 0,04 m (Tab. 10.1 a Tab. 10.2) a maximální rozdíl v načasování amplitudy je přibližně 15 minut (Graf 10.2 a Graf 10.4). Maximální rozdíl v načasování amplitud je navíc dosažen pouze v 5. periodě v kontrolní epizodě 2, jinak jsou rozdíly v načasování 0 až 3 minuty. Rozdíly hodnot kót v záporných amplitudách se pohybují od 0,01 m do 0,06 m (Tab. 10.1 a Tab. 10.2). Frekvence vypočítaného průběhu záporných amplitud je rychlejší, než frekvence daná výstupem ze simulace (Graf 10.2 a Graf 10.4). Toto způsobí, že již od 2. až 3. periody je rozdíl v načasování amplitud přibližně 10 minut a dále se zvětšuje.

Z výsledků výpočtu pro kontrolní epizody 1 a 2 je zřejmé, že kóty hladiny v záporných amplitudách jsou systematicky podhodnoceny. Je možné, že na výpočet průběhu záporných amplitud v případě provozu obou vodních elektráren negativně působí přítomnost absolutního členu v definované rovnici (člen A_0 – kapitola 3.4). Při součtu příspěvků od jednotlivých elektráren se sčítají i tyto členy A_0 a tím může být docíleno systematického podhodnocování kóty v záporných amplitudách. Tento jev je v kontrolních epizodách 1 a 2 pozorovaný pouze při výpočtu průběhu záporných amplitud.

Vzhledem k tomu, že koeficienty jednotlivých rovnic jsou odvozeny na základě odečtených vlastností vln v případě provozu vždy pouze jedné elektrárny, není v nich žádným způsobem zahrnut vliv provozu VE Orlík na vlny způsobené provozem VE Kamýk a naopak. Z Tab. 7.1 je patrné, že provoz 2TG na VE Orlík způsobí kladnou amplitudu o velikosti 0,23 m v 1. periodě. V Tab. 7.5 je stanoveno, že provoz 2 TG na VE Kamýk způsobí kladnou amplitudu o velikosti 0,05 m v 1. periodě. Z Tab. 7.1 a Tab. 7.5 je tak zjevné, že při výpočtu průběhu kladných amplitud má výrazně větší váhu příspěvek od provozu VE Orlík. Pokud dojde v nádrži k ovlivnění jednotlivých vln od VE Orlík a VE Kamýk, což není ve výpočtu zahrnuto, není dopad na výpočet průběhu kladných vln tak markantní, jako je tomu pro případ výpočtu vln záporných. Z Tab. 7.2 a Tab. 7.6 je totiž zřejmé, že příspěvek provozu jednotlivých elektráren na velikost a průběh amplitud záporných je rovnocennější. Tímto fenoménem je možné zdůvodnit, proč jsou při testu výpočtu pro současný provoz obou elektráren výsledky výpočtu průběhu záporných amplitud méně přesné, než výpočty průběhu amplitud kladných.

V kapitole 7.1 je také diskutována možnost nadhodnocení velikostí amplitud v případě malých průtoků. V kontrolní epizodě 2 je v provozu pouze jedna turbína na VE Kamýk a v kontrolní epizodě 1 jsou v provozu 2 turbíny. Počet turbín v provozu na VE

Orlík je pro obě kontrolní epizody totožný. Záporné amplitudy jsou v kontrolní epizodě 2 nadhodnoceny více, než v kontrolní epizodě 1. Vysvětlení podané v kapitole 7.1 je tak možné. Tento jev ovšem nemá vliv na průběh kladných amplitud, což může být vysvětleno pomocí vysvětlení z předchozího odstavce. To zní, že průběh kladných amplitud ovlivňuje především provozní režim VE Orlík, ten je pro obě kontrolní epizody totožný.

Dále jsou provedeny kontrolní výpočty pro epizody vycházející z měřených dat (kapitoly 10.3 a 10.4). Maximální rozdíl v kótách kladných amplitud při kontrolní epizodě 3 je 0,02 m a v kótách záporných amplitud 0,03 m. Chyby v načasování odpovídají výsledkům z kontrolní epizody 1 a 2. Hodnoty záporných amplitud jsou rovněž systematicky podhodnoceny. Výsledky z kontrolní epizody 3 tak potvrzují závěry, které jsou vyvozeny z kontrolních výpočtů epizod 1 a 2.

V kontrolní epizodě 4 je otestována metoda sčítání jednotlivých vln při změně průtoku na jedné elektrárně (změna v průtoku na VE Orlík). Použití takto definovaného výpočtu způsobí, že do výpočtu kladné vlny se dvakrát přičte člen A_0 definovaný pro rovnici A (Tab. 9.2) a do výpočtu záporné vlny se dvakrát přičte člen A_0 definovaný pro rovnici B (Tab. 9.2). Toto má za následek systematické nadhodnocování kladných amplitud (0,03 – 0,07 m), které není v předchozích kontrolních epizodách pozorováno. Dále dochází k ještě většímu systematickému podhodnocování kót hladin v záporných amplitudách (až 0,14 m), než jaké je pozorované v předcházejících kontrolních výpočtech. Načasování amplitud je stanoveno s přibližně stejnou přesností jako v kontrolních epizodách 1 – 3.

Obecně lze říci, že zvolená podoba rovnic a definované koeficienty velmi dobře slouží při výpočtu průběhu kladných amplitud dynamických vln, kdy nedochází ke změně průtoku v průběhu výrobního režimu elektráren. V tomto případě se odchylka v hodnotách kót v amplitudách pohybují na hranici přesnosti měření ($\pm 0,05$ m) a načasování amplitud je stanoveno s přesností ± 15 minut. Při výpočtu průběhu kladných amplitud, kdy nastává změna ve výrobním režimu elektráren, dochází vlivem sčítání absolutních členů A_0 k systematickému nadhodnocování kót v amplitudách do 0,1 m. Nutno říci, že při nadhodnocování kót v kladných amplitudách je systematická chyba na bezpečné straně. Při výpočtu průběhu záporných amplitud, kdy nedochází ke změně ve výrobních režimech elektráren, je kóta hladiny systematicky podhodnocena o 0,01 až 0,07 m. Pokud dochází ke změně ve výrobních režimech, je potom podhodnocena a více než 0,1 m.

Systematická chyba je opět na bezpečné straně. Výpočet načasování záporných amplitud s přesností do ± 15 minut je možný v 1. až 3. periodě.

Pro budoucí postup prací je nutno přemýšlet o významu absolutního členu A_0 v sestavených rovnicích a jakým způsobem ho definovat, aby byly minimalizovány systematické chyby ve výpočtu a dosažena požadovaná přesnost výpočtu pro různé výrobní režimy obou vodních elektráren. Pokud je uvažována několikanásobná změna v provozním režimu každé elektrárny, dochází tak k násobení hodnoty absolutního členu A_0 a systematická chyba narůstá. V kontrolní epizodě 4, kde je uvažována 1 změna průtoku na VE Orlik, je výpočet průběhu kladných amplitud stále dostatečně přesný (chyba do 0,1 m), ale výpočet průběhu amplitud záporných již vykazuje značnou systematickou chybu (až 0,14 m). Pokud by došlo k další změně průtoku, lze předpokládat, že by i vypočítaný průběh kladných amplitud přesáhl systematickou chybu 0,1 m. Definované rovnice jsou tak vhodné pro výpočet průběhu kladných amplitud, kdy je zaznamenána maximálně jedna změna v provozním režimu elektráren, a pro výpočet průběhu záporných amplitud, kdy je průtok elektrárnami po celou dobu konstantní. Pro výpočet epizod, kdy dochází ke změnám ve výrobních režimech, by, dle dosažených výsledků, bylo vhodnější přičíst absolutní člen pouze jednou, například jako zvolené maximum z absolutních členů.

12 NÁVRH NA BUDOUCÍ VÝZKUM

12.1 Způsob ukončení provozu vodních elektráren

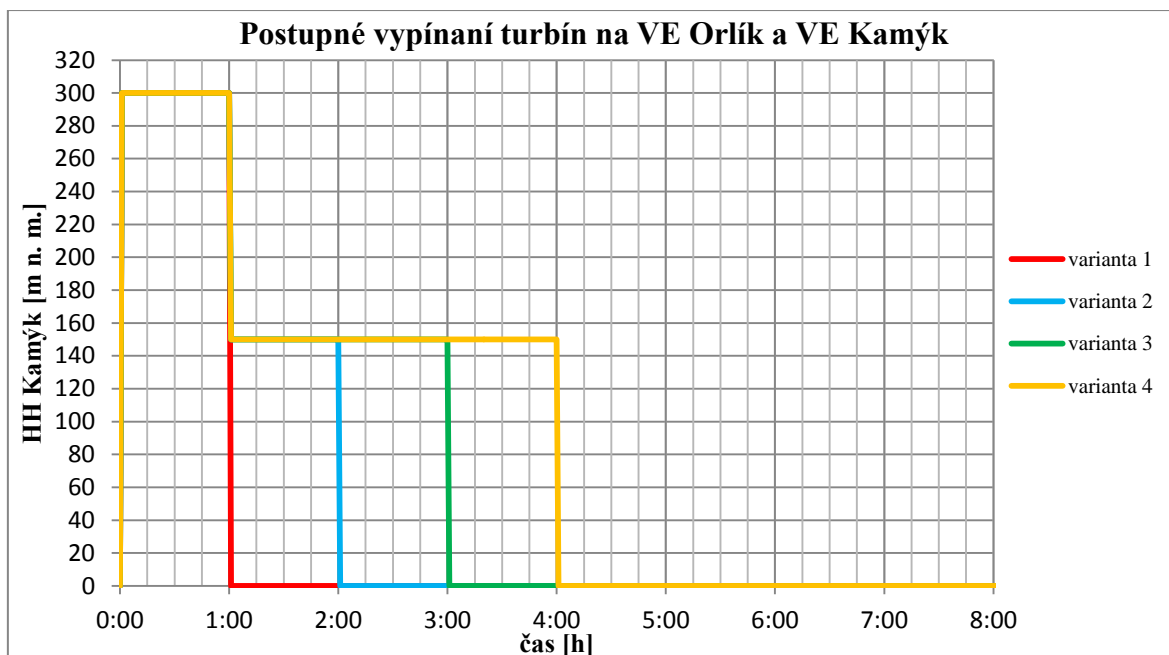
Způsob ukončení provozu vodních elektráren, jež zajistí minimalizování dynamických vln vznikajících ve VN Kamýk (velikosti kladných a záporných amplitud), umožní lepší využití hydroenergetického potenciálu obou vodních elektráren. V rámci návrhu pro možný budoucí výzkum je provedeno testování způsobu ukončení provozu elektráren na sestaveném matematické modelu nádrže v SW HEC-RAS (kapitola 6). Pro všechny simulace je počáteční podmínka (hladina v nádrži) stanovena hodnotou 283,35 m n. m (kapitola 6.4). Horní a dolní okrajová podmínka je totožná v celém čase trvání simulované epizody (průtoky VE Orlik a VE Kamýk jsou totožné).

První sada testovaných variant je znázorněna na Grafu 12.1. Pro všechny varianty je průtok oběma elektrárnami v čase 0:00 – 1:00 $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Ve variantě 1 je v čase 1:00 ukončen provoz obou elektráren. Ve variantě 2, 3 a 4 je v čase 1:00 snížen průtok oběma elektrárnami na polovinu ($180 \text{ m}^3/\text{s}$). Ve variantě 2 je provoz ukončen ve 2:00, ve variantě 3 ve 3:00 a ve variantě 4 ve 4:00. Výsledek simulací, v podobě průběhu hladiny v profilu VD Kamýk, je znázorněn v Grafu 12.2. V Tab. 12.1 je zaznamenána maximální hladina, která je dosažena v průběhu epizody, a perioda, ve které se tato hladina objeví. Dále je v Tab. 12.1 zaznamenána velikost amplitudy, což je definováno jako rozdíl maximální dosažené hladiny a ustálené hladiny (283,35 m n. m.). Z výsledku je patrné, že pokud při ukončování provozu snížíme nejdříve průtok o polovinu a až za jistý čas (1 – 3 hodiny) ukončíme provoz úplně, je hodnota amplitudy snížena o přibližně 40 %.

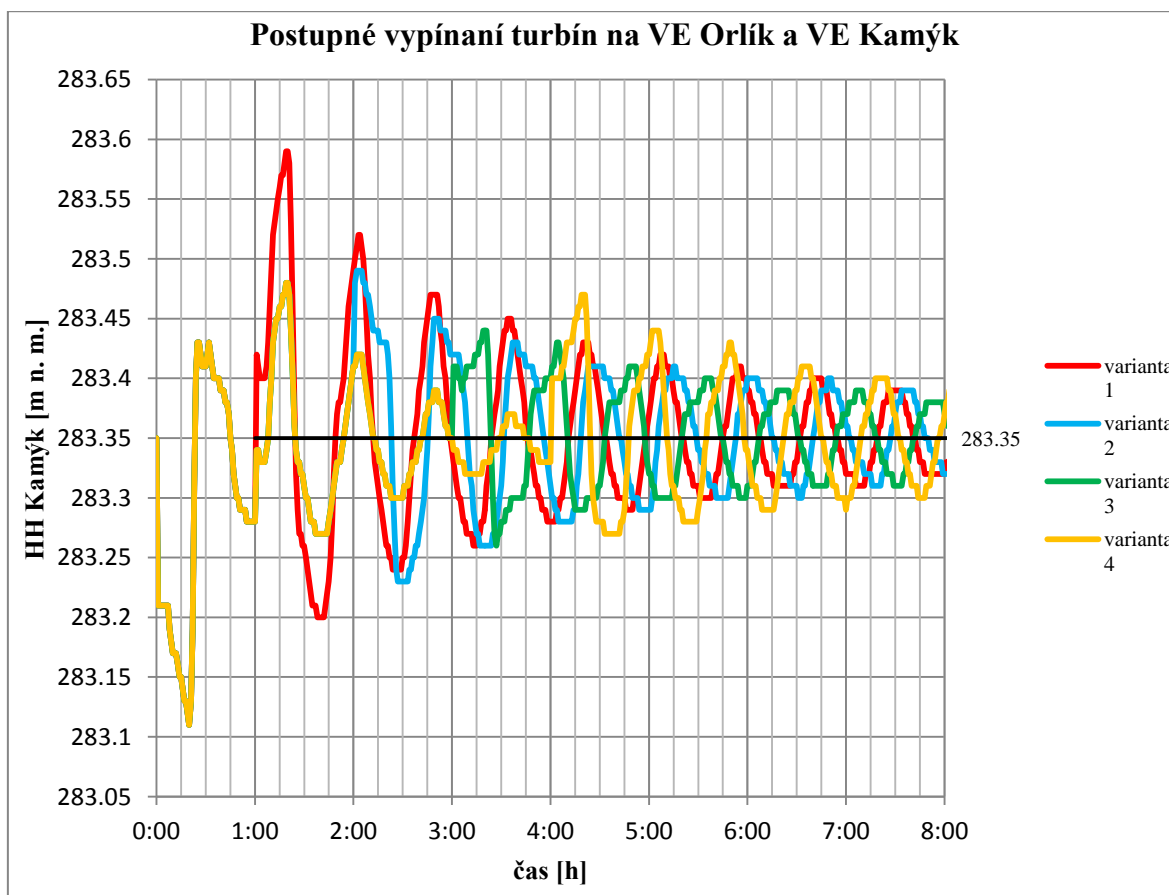
Druhá sada testovaných variant je znázorněna v Grafu 12.3. Pro všechny varianty je průtok oběma elektrárnami v čase 0:00 – 1:00 $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Ve variantě 1 je v čase 1:00 ukončen provoz obou elektráren. Ve variantě 2 je od času 1:00 průtok elektrárnami rovnoměrně po dobu 23 minut (cca polovina periody dynamických vln) snižován k 0. Ve variantě 3 je průtok elektrárnami rovnoměrně snižován k 0 po dobu 47 minut (cca 1 perioda dynamických vln) a ve variantě 4 po dobu 1 hodiny. Výsledek simulací, v podobě průběhu hladiny v profilu VD Kamýk, je znázorněn v Grafu 12.4. V Tab. 12.2 je zaznamenána maximální hladina, která je dosažena v průběhu epizody, a perioda, ve které se tato hladina objeví. Dále je v Tab. 12.2 zaznamenána velikost amplitudy, což je definováno jako rozdíl maximální dosažené hladiny a ustálené hladiny (283,35 m n. m.).

Z výsledku je patrné, že ve variantě 2 je hodnota amplitudy snížena oproti variantě 1 o přibližně 30 % a ve variantě 3 a 4 dokonce o cca 60 %.

Graf 12.1 Postupné vypínání turbín - průtoky



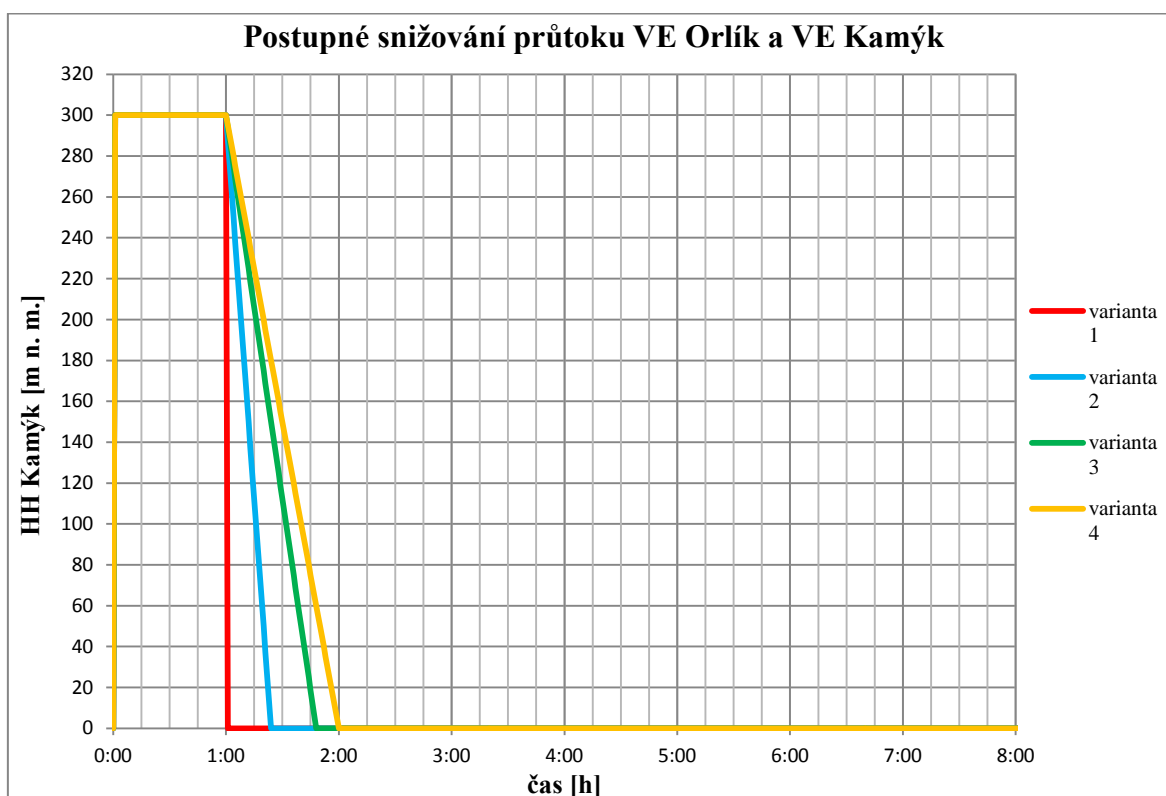
Graf 12.2 Postupné vypínání turbín - průběh hladiny



Tab. 12.1 Postupné vypínání turbín - vyhodnocení

Varianta	Max. dosažená hladina	perioda	Velikost amplitudy
	[m n. m.]		[m]
1	283.59	1	0.24
2	283.49	2	0.14
3	283.48	1	0.13
4	283.48	1	0.13

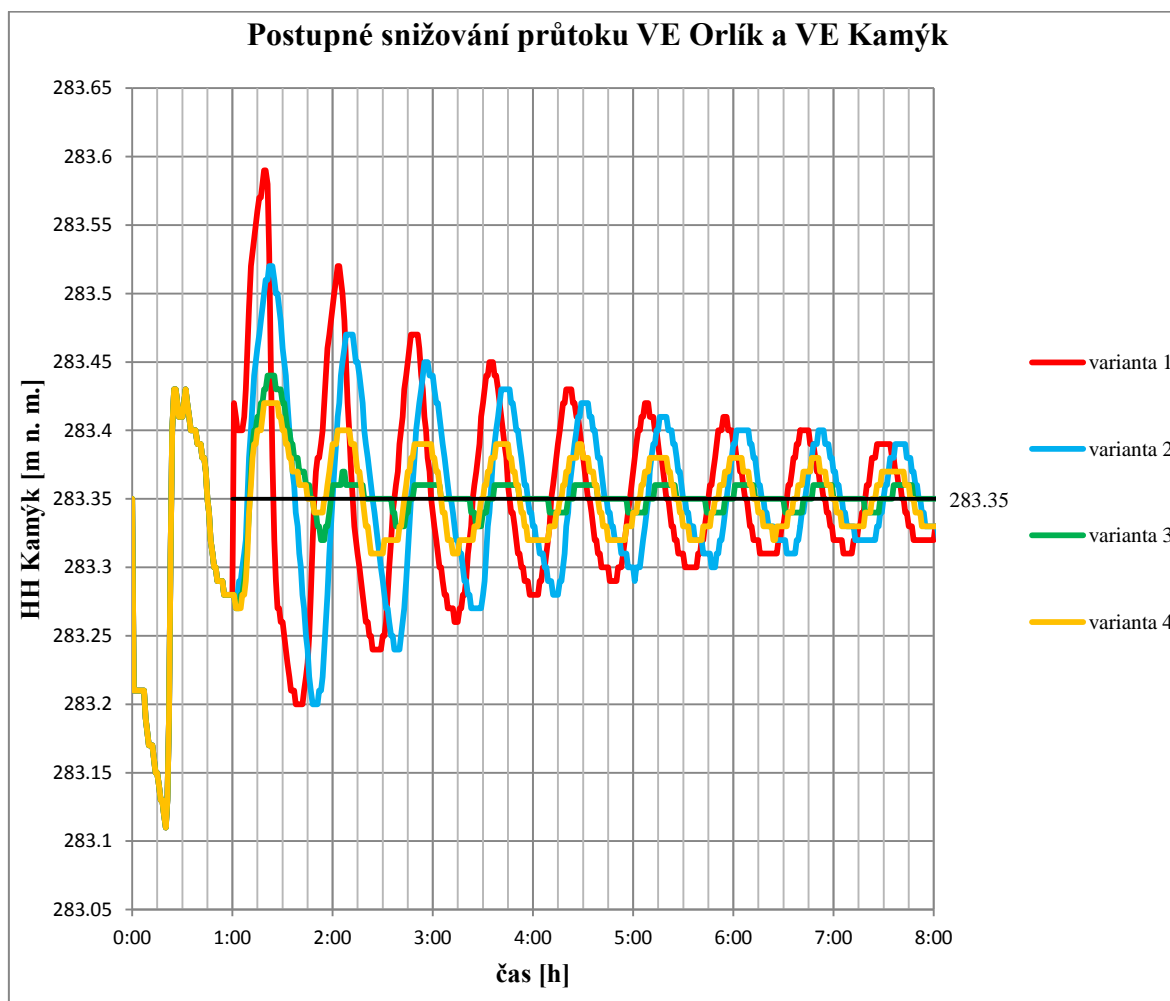
Graf 12.3 Postupné snižování průtoku - průtoky



Tab. 12.2 Postupné snižování průtoku - vyhodnocení

Varianta	Max. dosažená hladina	perioda	Velikost amplitudy
	[m n. m.]		[m]
1	283.59	1	0.24
2	283.52	1	0.17
3	283.44	1	0.09
4	283.43	1	0.08

Graf 12.4 Postupné snižování průtoku - průběh hladiny



Dále je porovnávána varianta 2 z první sady simulací (Graf 12.1) a varianta 4 z druhé sady simulací (Graf 12.3). V těchto variantách je suma průtoků elektrárnami totožná, ale jejich rozložení v čase se liší. Při variantě 2 z první sady simulací je maximální velikost kladné amplitudy 0,14 m (Tab. 12.1) a při variantě 4 z druhé sady simulací 0,08 m (Tab. 12.2). Maximální velikost amplitudy je tak snížena o téměř polovinu.

Ze simulací provedených v této kapitole vyplývá, že způsob ukončení provozu vodních elektráren má značný vliv na velikost konečných amplitud. Předmětem možného budoucího výzkumu by tak mohlo být definování velikosti dynamických vln v závislosti na režimu ukončení provozu vodních elektráren, případně navržení optimálního vypínacího režimu.

13 ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo definovat matematické funkce, jež budou popisovat průběh kladných a záporných amplitud dynamických vln, které vznikají v nádrži Kamýk vlivem provozních režimů VE Orlík a VE Kamýk.

Závěrem je provedeno vyhodnocení jednotlivých cílů práce stanovených v úvodu:

- K identifikování vlastností dynamických vln v závislosti na provozních režimech VE Orlík a VE Kamýk je třeba získat jednotlivý příspěvek k průběhu vlnění od provozu každé elektrárny. V matematickém modelu VN Kamýk jsou proto provedeny simulace různých provozních režimů VE Orlík a VE Kamýk. Z výsledků simulací jsou získány průběhy dynamických vln při provozu každé elektrárny a jsou odvozeny požadované vlastnosti vlnění dané výrobními režimy, tedy velikosti kladných a záporných amplitud v 1. až 5. periodě, délky 1. až 5. periody a rozdíl výchozí a konečné hladiny v nádrži.
- Jsou formulovány čtyři matematické funkce popisující vliv provozního režimu VE Orlík a VE Kamýk na průběh kladných a záporných amplitud. Daný přístup uvažuje, že je jednotlivě vyčíslen vliv provozu VE Orlík na průběh kladných a záporných amplitud (rovnice A a B) a vliv provozu VE Kamýk na průběh kladných a záporných amplitud (rovnice C a D). Konečný průběh kladných a záporných amplitud je potom získán součtem příspěvků od provozu každé elektrárny. Koeficienty rovnic jsou definovány na základě vlastností dynamických vln získaných ze simulací v matematickém modelu.
- Možná přesnost výpočtu velikosti a načasování amplitud je stanovena pomocí provedení kontrolních výpočtů pro čtyři různé epizody, které jsou reprezentovány různými provozními režimy elektráren. Přesnost výpočtu velikosti kladných amplitud pro výrobní režimy, kdy nedochází ke změně průtoku elektrárnou, je $\pm 0,05$ m a pohybuje se tak na hranici přesnosti měření. V případě, že dochází k jedné změně průtoku elektrárnou, je velikost kladné amplitudy vlivem sčítání absolutního členu rovnic systematicky nadhodnocena do 0,1 m. Přesnost výpočtu načasování kladné amplitudy je ± 15 minut. Velikosti záporných amplitud, kdy nedochází ke změně průtoku elektrárnou, jsou systematicky nadhodnoceny o 0,01 až 0,07 m. Pokud dochází k jedné změně průtoku elektrárnou, jsou velikosti záporných amplitud nadhodnoceny o více než 0,1 m. Výpočet načasování záporných amplitud s přesností do ± 15 minut je možný v 1. až 3. periodě. Definované rovnice jsou tak

vhodné pro výpočet průběhu kladných amplitud, kdy je zaznamenaná maximálně jedna změna v provozním režimu elektráren, a pro výpočet průběhu záporných amplitud, kdy je průtok elektrárnami po celou dobu konstantní. Všechny systematické chyby se nacházejí na bezpečné straně.

14 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **FOŠUMPAUR, Pavel.** *Modelový výzkum proudění v nádrži Kamýk v souvislosti s přípravou lodního zdvihadla Orlík.* 2009.
2. **VODNÍ DÍLA - TBD, a.s.** *Manipulačně řád VD Kamýk.* 1996.
3. Vodní dílo Orlík. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/orlik.pdf>.
4. Vodní dílo Kamýk. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <http://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/vodni-dila-a-nadrze/kamyk.pdf>.
5. **BÉM, Jiří a kol.** *Hydraulika.* Praha : SNTL, 1983.
6. **AKAN, A. Osman.** *Open channel hydraulics.* Oxford : Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 9780750668576.
7. **STURM, Terry W.** *Open channel hydraulics.* New York : McGraw-Hill, 2010. ISBN 9780071267939.
8. The Hydrologic Engineering system - US Army Corps of Engineers. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] <http://www.hec.usace.army.mil/>.
9. Definice a vyřešení problému pomocí Řešitele. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <https://support.office.com/cs-cz/article/Definice-a-vy%C5%99e%C5%A1en%C3%AD-probl%C3%A9mu-pomoc%C3%AD-%C5%98e%C5%A1itele-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c>.
10. Vodní elektrárna Kamýk. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/kamyk.html>.
11. Mapy.cz. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <http://mapy.cz>.
12. Vodní elektrárna Orlík. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/orlik.html>.
13. Listy Základní vodohospodářské mapy. [Online] [Citace: 19. květen 2016.] Dostupné z WWW: <http://heis.vuv.cz/>.

15 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Výpočetní řezy v matematickém modelu (hnědá: zadané, oranžová: interpolované).....	11
Obr. 5.1 Lokalizace VN Kamýk na území ČR (11)	19
Obr. 5.2 Prostorové uspořádání VE Orlík a VE Kamýk (13).....	21
Obr. 6.1 Schematizace VN Kamýk v HEC-RAS	22

16 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Rozdělení prostoru nádrže Kamýk (2)	12
Tab. 6.1 Vliv výchozí hladiny - seznam simulací - VE Orlík	30
Tab. 6.2 Vliv výchozí hladiny - seznam simulací - VE Kamýk	30
Tab. 6.3 Vliv výchozí hladiny - VE Orlík 1-4 TG	32
Tab. 6.4 Vliv výchozí hladiny - VE Kamýk 1-4 TG	33
Tab. 6.5 Simulace provozních režimů - VE Orlík	34
Tab. 6.6 Simulace provozních režimů - VE Kamýk	34
Tab. 7.1 Vlastnosti dynamických vln - kladné amplitudy - VE Orlík	36
Tab. 7.2 Vlastnosti dynamických vln - záporné amplitudy - VE Orlík	36
Tab. 7.3 Vlastnosti dynamických vln - periody - VE Orlík	36
Tab. 7.4 Vlastnosti dynamických vln - počáteční vs. konečná hladiny - VE Orlík	37
Tab. 7.5 Vlastnosti dynamických vln - kladné amplitudy - VE Kamýk	37
Tab. 7.6 Vlastnosti dynamických vln - záporné amplitudy - VE Kamýk	37
Tab. 7.7 Vlastnosti dynamických vln - periody - VE Kamýk	37
Tab. 7.8 Vlastnosti dynamických vln - počáteční vs. konečné hladiny - VE Kamýk	38
Tab. 7.9 Linearita kladné amplitudy - VE Orlík	46
Tab. 7.10 Linearita záporné amplitudy - VE Orlík	46
Tab. 7.11 Linearita kladné amplitudy - VE Kamýk	47
Tab. 7.12 Linearita záporné amplitudy - VE Kamýk	47
Tab. 8.1 Bilance hladin - ověření hodnoty koeficientu	50
Tab. 8.2 Bilance hladin - koeficienty rovnice	50
Tab. 9.1 Koeficient T	51
Tab. 9.2 Koeficienty $A_0, A_1, -b$	52
Tab. 9.3 Koeficient t_0	53
Tab. 9.4 Koeficient φ	54
Tab. 9.5 Ověření rovnice A - kladná amplituda - VE Orlík	60
Tab. 9.6 Ověření rovnice B - záporná amplituda - VE Orlík	61
Tab. 9.7 Ověření rovnice C - kladná amplituda - VE Kamýk	62
Tab. 9.8 Ověření rovnice D - záporné amplitudy - VE Kamýk	63
Tab. 10.1 Kontrolní epizoda 1 - vyhodnocení	65
Tab. 10.2 Kontrolní epizoda 2 - vyhodnocení	67
Tab. 10.3 Kontrolní epizoda 3 - vyhodnocení	69
Tab. 10.4 Kontrolní epizoda 4 - vyhodnocení	71
Tab. 12.1 Postupné vypínání turbín - vyhodnocení	78
Tab. 12.2 Postupné snižování průtoku - vyhodnocení	78

17 SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1 Výrobní režimy VE Orlík a VE Kamýk - leden 2014.....	7
Graf 2.2 Výrobní režimy VE Orlík a VE Kamýk - detail.....	8
Graf 2.3 Průběh hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk) - leden 2014.....	9
Graf 2.4 Průběh hladiny v profilu VD Kamýk (HH Kamýk) - detail.....	10
Graf 3.1 Odvození vlastností vlnění v závislosti na výrobním režimu VE.....	15
Graf 6.1 Kalibrační epizoda - průtoky VE Orlík.....	25
Graf 6.2 Kalibrační epizoda - průběhy hladiny HH Kamýk.....	25
Graf 6.3 Validační epizoda 7.5.2014 - průtoky.....	27
Graf 6.4 Validační epizoda 7.5.2014 – průběh hladiny.....	27
Graf 6.5 Validační epizoda 10.12. - 11.12. - průtoky.....	28
Graf 6.6 Validační epizoda 10.12. - 11.12. - průběh hladiny.....	28
Graf 6.7 Validační epizoda 7.3. - 8.3. - průtoky.....	29
Graf 6.8 Validační epizoda 7.3. - 8.3. - průběh hladiny.....	29
Graf 6.9 Vliv výchozí hladiny - VE Orlík 1-4 TG.....	31
Graf 6.10 Vliv výchozí hladiny - VE Kamýk 1-4 TG.....	32
Graf 6.11 Provozní režimy - VE Orlík (1-4 TG).....	34
Graf 6.12 Provozní režimy - VE Kamýk (1-4 TG).....	35
Graf 7.1 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 1. perioda.....	39
Graf 7.2 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 2. perioda.....	39
Graf 7.3 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 3. perioda.....	40
Graf 7.4 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 4. perioda.....	40
Graf 7.5 Linearita kladných amplitud - VE Orlík - 5. perioda.....	40
Graf 7.6 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 1. perioda.....	41
Graf 7.7 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 2. perioda.....	41
Graf 7.8 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 3. perioda.....	41
Graf 7.9 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 4. perioda.....	42
Graf 7.10 Linearita záporných amplitud - VE Orlík - 5. perioda.....	42
Graf 7.11 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 1. perioda.....	42
Graf 7.12 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 2. perioda.....	43
Graf 7.13 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 3. perioda.....	43
Graf 7.14 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 4. perioda.....	43
Graf 7.15 Linearita kladných amplitud - VE Kamýk - 5. perioda.....	44
Graf 7.16 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 1. perioda.....	44
Graf 7.17 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 2. perioda.....	44
Graf 7.18 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 3. perioda.....	45
Graf 7.19 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 4. perioda.....	45
Graf 7.20 Linearita záporných amplitud - VE Kamýk - 5. perioda.....	45
Graf 8.1 Bilance hladin - VE Orlík.....	49
Graf 8.2 Bilance hladin - VE Kamýk.....	50
Graf 9.1 Koeficient t_0	52
Graf 9.2 Stanovení koeficientu φ	53
Graf 9.3 Parametr Q.....	54

Graf 9.4 Ověření rovnice A a B - VE Orlický 1TG	55
Graf 9.5 Ověření rovnice A a B - VE Orlický 2TG	56
Graf 9.6 Ověření rovnice A a B - VE Orlický 3 TG	56
Graf 9.7 Ověření rovnice A a B - VE Orlický 4TG	57
Graf 9.8 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 1TG	57
Graf 9.9 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 2TG	58
Graf 9.10 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 3TG	58
Graf 9.11 Ověření rovnice C a D - VE Kamýk 4TG	59
Graf 10.1 Kontrolní epizoda 1 - průtoky	64
Graf 10.2 Kontrolní epizoda 1 - průběh hladiny	65
Graf 10.3 Kontrolní epizoda 2 - průtoky	66
Graf 10.4 Kontrolní epizoda 2 - průběh hladiny	67
Graf 10.5 Kontrolní epizoda 3 - průběh hladiny	68
Graf 10.6 Kontrolní epizoda 4 - průtoky	69
Graf 10.7 Kontrolní epizoda 4 - průběh hladiny	70
Graf 12.1 Postupné vypínání turbín - průtoky	77
Graf 12.2 Postupné vypínání turbín - průběh hladiny	77
Graf 12.3 Postupné snižování průtoku - průtoky	78
Graf 12.4 Postupné snižování průtoku - průběh hladiny	79