

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická**

Czech Technical University in Prague  
Faculty of Electrical Engineering

Katedra řídicí techniky  
Department of Control Engineering



**Fuzzy model chování dispečera výkonové rovnováhy**

Fuzzy model of behavior of power balance operator

**Bakalářská práce**

Vypracoval: **Jakub Chodounský**

Ročník: 4.

Školní rok: 2007/2008

Datum a místo: leden 2008, Praha

Vedoucí: Ing. Radek Šindelář PhD



Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

## Zadání bakalářské práce

Student: Jakub Chodounský

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Fuzzy model chování dispečera

### Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte stávající model spolehlivosti a ekonomie systémových služeb SESyS.
2. Seznamte se s principy fuzzy modelování.
3. Navrhněte strukturu vstupních dat použitou pro model chování dispečera.
4. Vytvořte fuzzy model chování dispečera řízení výkonové rovnováhy.

**Seznam odborné literatury:** Dodá vedoucí práce

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Radek Šindelář

**Datum zadání bakalářské práce:** zimní semestr 2006/07

**Termín odevzdání bakalářské práce:** 15. 8. 2007

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.  
děkan



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

Podpis .....



## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se se stávajícím modelem SESyS a navrhnout část modelu dispečera výkonové rovnováhy, provádějící aktivaci terciární regulace, pomocí fuzzy modelování.

V této práci je nejdříve stručně popsán model SESyS. Po té je popsán celý model dispečera výkonové rovnováhy. Dále práce obsahuje návrh několika modelů dispečera výkonové rovnováhy a jejich srovnání. V závěru je pak srovnán nejlepší z navržených modelů se stávajícím modelem dispečera výkonové rovnováhy.

## **Annotation**

The objective of this bachelor thesis was to study existing SESyS model and to design the part of model of power balance operators' behavior which activates tertiary regulation, through the use of fuzzy modeling.

At the beginning of this thesis is briefly described SESyS model. After that is described whole power balance operator's model. Thesis also includes couple of designs of power balance operator's model and its comparisons. At the end is comparison of the best from the designed models with existing model of power balance operator.





## **Poděkování**

Chtěl bych velmi poděkovat všem, kdo mi pomáhali při tvorbě této práce, ať už přímo nebo nepřímo. Zvláště pak děkuji Ing. Radku Šindelářovi PhD, vedoucímu mé bakalářské práce, za trpělivost, cenné rady a podnětné připomínky.



# Obsah

<b>1.</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>MODEL SESYS .....</b>	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>MODEL DISPEČERA VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY A REGULÁTORŮ FREKVENCE A VÝKONU.....</b>	<b>5</b>
4.1.	MODEL REGULÁTORŮ PRIMÁRNÍ REGULACE FREKVENCE A SEKUNDÁRNÍ REGULACE FREKVENCE A VÝKONU. ....	8
4.2.	MODEL DISPEČERA VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY.....	9
<b>5.</b>	<b>FUZZY MODELOVÁNÍ.....</b>	<b>11</b>
5.1.	FUZZY SYSTÉMY.....	11
<b>6.</b>	<b>FUZZY DESIGNER .....</b>	<b>14</b>
6.1.	POPIS PROGRAMU .....	14
6.2.	PŘIPOJENÍ FUZZY DESIGNERU K MATLABU.....	14
<b>7.</b>	<b>FUZZY MODEL DISPEČERA PRO TERCÍÁRNÍ REGULACI.....</b>	<b>15</b>
7.1.	ZPŮSOB NÁVRHU.....	15
7.2.	POPIS JEDNOTLIVÝCH VERZÍ MODELU .....	15
7.2.1.	<i>Dvoustavový model.....</i>	<i>16</i>
7.2.2.	<i>Třístavový model.....</i>	<i>18</i>
7.2.3.	<i>Třístavový model s hysterezí.....</i>	<i>21</i>
7.2.4.	<i>Třístavový model s hysterezí a predikcí výpadku.....</i>	<i>23</i>
7.2.5.	<i>Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce.....</i>	<i>25</i>
7.2.6.	<i>Model s predikcí vývoje odchylky energie .....</i>	<i>33</i>
<b>8.</b>	<b>POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH MODELŮ .....</b>	<b>40</b>
8.1.	ZPŮSOBY POROVNÁNÍ .....	40
8.2.	POROVNÁNÍ.....	41
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
<b>10.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>45</b>

# 1. Seznam zkratek

PS	-přenosová soustava
PpS	-podpůrné služby
SyS	-systémové služby
PR	-primární regulace
SR	-sekundární regulace
TR	-terciární regulace
TR+	-kladná terciární regulace
TR-	-záporná terciární regulace
QS	-rychle startující záloha („quick start“)
DZ	-dispečerská záloha
HV	-havarijní výpomoc
Eregdo30	-zahraniční regulační energie dostupná do 30 minut
Eregnad30	-zahraniční regulační energie dostupná za dobu delší než 30 minut
RZPR	-regulační záloha primární regulace
RZSR	-regulační záloha sekundární regulace
RZTR	-regulační záloha terciární regulace
RZTR+	-kladná regulační záloha terciární regulace
RZTR-	-záporná regulační záloha terciární regulace
RZQS	-regulační záloha rychle startující zálohy
dP <sub>o</sub>	-saldo odchylky výkonu v otevřené smyčce
dP <sub>c</sub>	-saldo odchylky výkonu v uzavřené smyčce
dE <sub>o</sub>	-saldo odchylky energie v otevřené smyčce
dE <sub>c</sub>	-saldo odchylky energie v uzavřené smyčce

## 2. Úvod

ČEPS, a.s. je akciová společnost provozující ze zákona přenosovou soustavu ČR. Jejím úkolem je mimo jiné i zajištění rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v každém okamžiku. To provádí aktivací různých PpS, které předem nakoupí od poskytovatelů těchto služeb.

Podpůrné služby (PpS) jsou prostředky sloužící k zajištění systémových služeb PS ČR. Ty spočívají ve změně výkonu bloku, nebo snížení odběru ze soustavy. PpS jsou rozděleny do několika kategorií podle jejich charakteru např. doby náběhu nebo minimální doby po kterou výrobce zaručuje poskytování této služby.

Model spolehlivosti a ekonomiky zajištění systémových služeb (dále jen SESyS) je určen k výpočtu potřebného množství podpůrných služeb, nutného pro zajištění rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie, v cenově nejvýhodnějším složení.

Součástí tohoto modelu je také model dispečera výkonové rovnováhy, který slouží k ověření dodržení normy spolehlivosti. Současný model dispečera sice velmi dobře provádí regulaci modelu PS, ale pouze z pohledu celkových statistik odchylek výkonu a energie, jeho chování neodpovídá chování skutečného dispečera. Cílem této práce je tedy vytvořit model dispečera, konkrétně model pro nasazování terciární regulace, pomocí fuzzy modelování, který bude více odpovídat reálnému chování dispečera.

Tato práce se skládá z několika částí, z nichž první obsahuje stručný popis modelu SESyS a současné implementace modelu dispečera výkonové nerovnováhy. Druhá část obsahuje charakteristiku fuzzy systémů. Třetí část pak popisuje způsob návrhu fuzzy modelu dispečera, jeho jednotlivé verze a jejich srovnání.

### 3. Model SESyS

Model SESyS slouží k určení objemu a ceny podpůrných služeb nutných k zajištění dodržení normy spolehlivosti.

Celý algoritmus se skládá z několika kroků. Nejprve je nutné zadat vstupní parametry jako jsou očekávaná cena silové elektřiny v zahraničí očekávaná cena PpS a další. Poté je spuštěn model trhu se silovou elektřinou, kde jsou vypočítány smluvené hodinové diagramy výroby elektřiny po blocích a výrobcích, odběru elektřiny v České republice, exportu a importu. Pak jsou pomocí modelu soustavy v otevřené smyčce vypočítány odchylky výkonu a energie v soustavě, pokud by soustava s nasmlouvanou výrobou a predikovaným zatížením nebyla regulována. Z těchto veličin jsou určeny požadavky na množství jednotlivých podpůrných služeb nutných k zajištění normy spolehlivosti. Následně je vytvořena poptávka, kterou provozovatel přenosové soustavy umístí na trh. Na modelu ročního trhu s podpůrnými službami jsou vypočteny nabízené objemy a jejich ceny od každého poskytovatelů v jednotlivých kategoriích podpůrných služeb. Z vytvořené nabídky je vybrána požadovaná skladba PpS za co nejnižší cenu. Nakonec je spuštěna simulace soustavy v uzavřené smyčce, jejíž součástí je model dispečera výkonové rovnováhy, která slouží k ověření splnění normy spolehlivosti.

## 4. Model dispečera výkonové rovnováhy a regulátorů frekvence a výkonu

Schéma na obr. 4-1 znázorňuje PS, modrý blok představuje dispečink ČEPSu, kde je umístěn dispečer výkonové rovnováhy, který aktivuje PpS kromě PR a SR, které jsou aktivovány automaticky.

Blokové schéma na obr. 4-2 znázorňuje simulační dynamický model dispečera výkonové rovnováhy. Tento model slouží k ověření splnění normy spolehlivosti pomocí simulace v uzavřené smyčce.

Model obsahuje následující části: model nenarušeného provozu, model výpadků bloků, primární a sekundární regulace, terciární regulace, rychle startující záloha (quick start) a dispečerská záloha, regulační energie do třiceti a nad třicet minut a havarijní výpomoc. Charakteristické veličiny ( $dP_o$  a  $dP_c$ ) a uvedené regulace jsou ukládány do proměnných přístupných pomocí programu MATLAB.

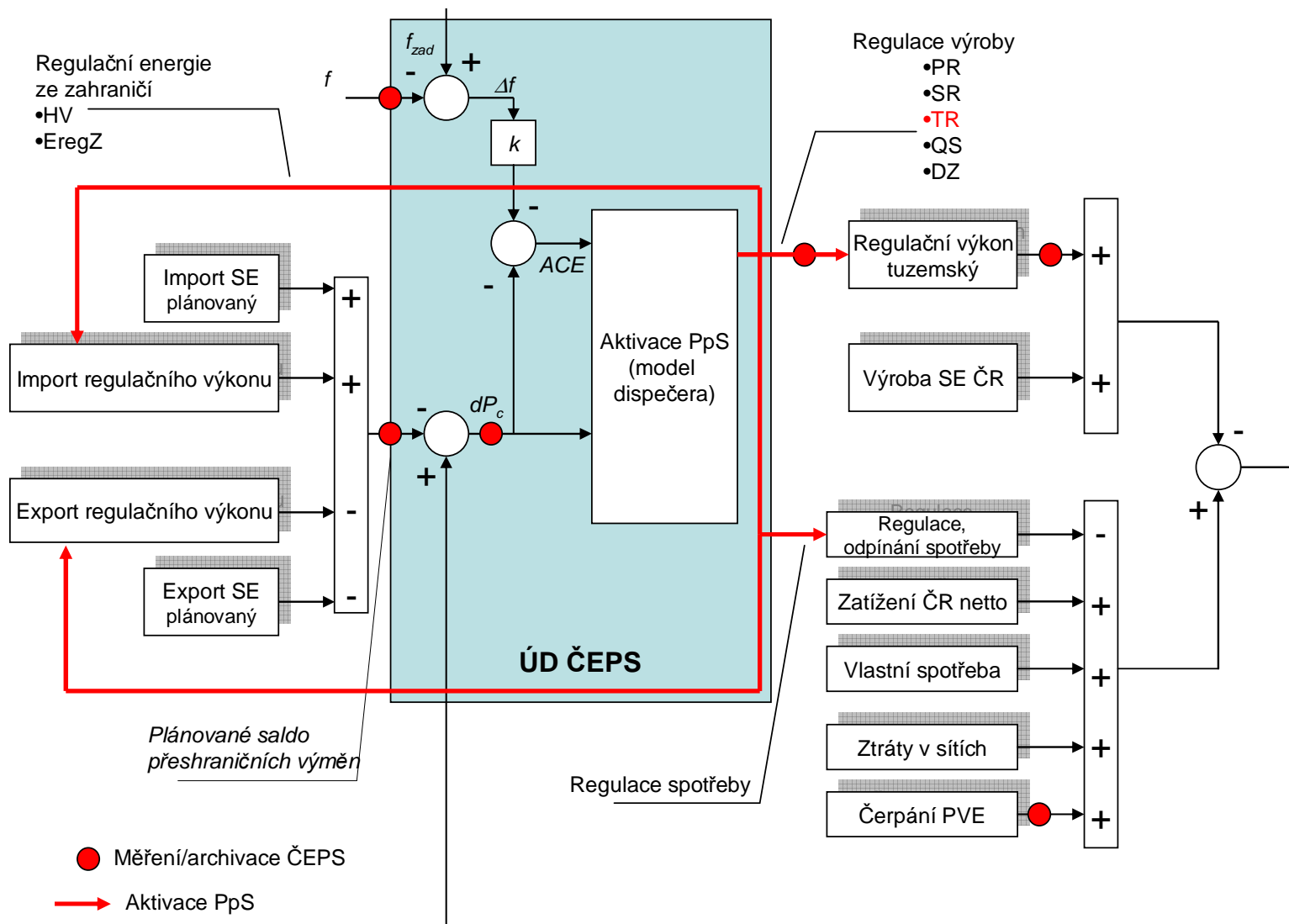
Model nenarušeného provozu představuje výrobu elektřiny jednotlivými bloky tak, jak byla naplánována. To znamená bez jakýchkoliv výpadků. Ty jsou modelovány v modelu výpadků bloků.

Veličina  $dP_c$  představuje odchylku výkonu po regulaci, tedy přeshraniční tok výkonu, který nebyl plánován. Veličina  $dP_o$  představuje  $dP_c$  od které je odečtena regulace.

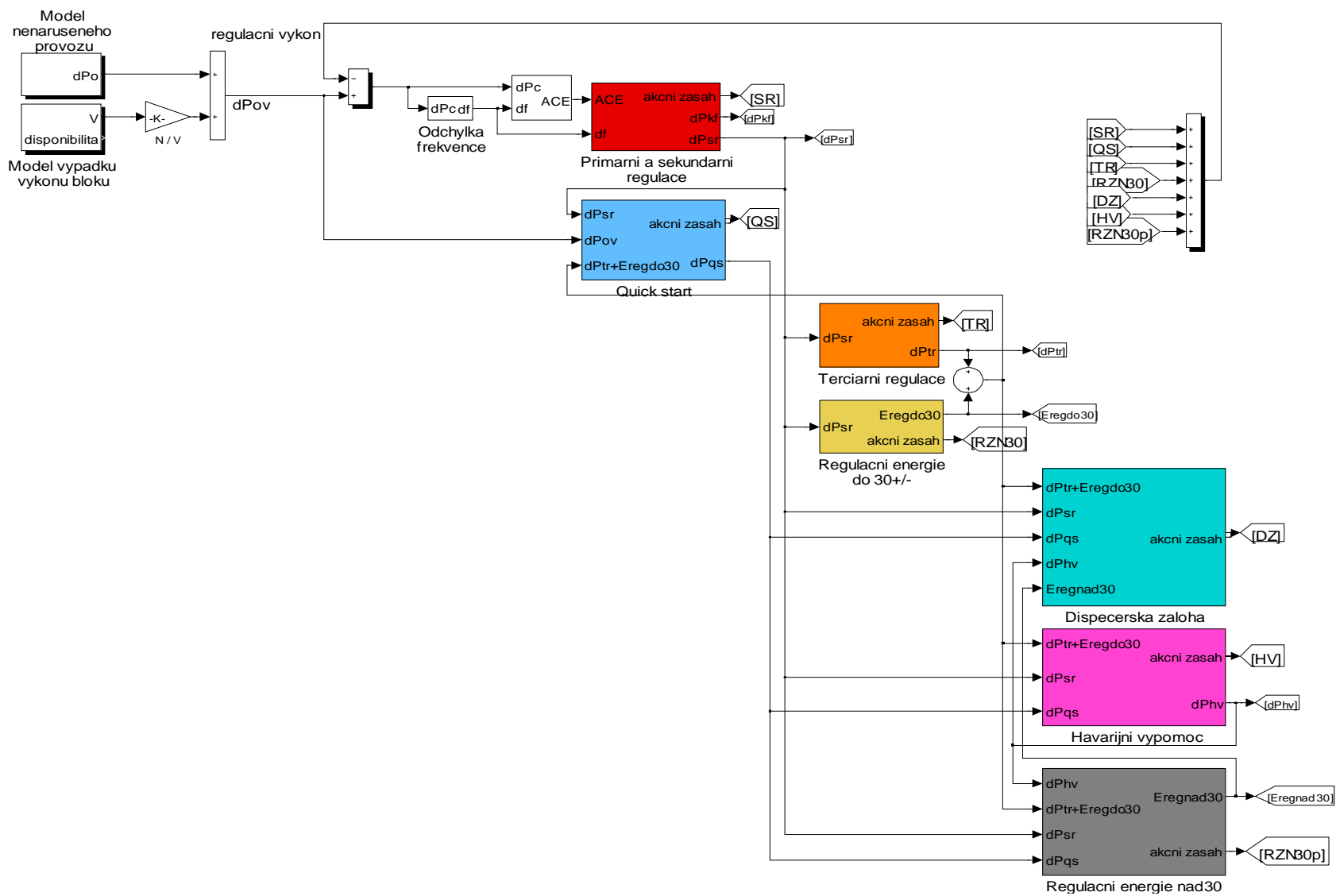
Jako vstup jsou použity výstupy simulací chování elektrizační soustavy a výpadku bloků. Dále pak množství nakoupených PpS v jednotlivých kategoriích. Vstupem tohoto modelu mohou být také reálná data.

Následující popis jednotlivých bloků, které aktivují jednotlivé PpS, je rozdělen do dvou částí kvůli rozdílnému způsobu aktivace těchto PpS. První část je věnována těm PpS, které jsou aktivovány automaticky a reálný dispečer nemá na jejich aktivaci vliv. Druhá je pak věnována těm PpS, které aktivuje dispečer svým pokynem.

Obr. 4-1 Schéma PS







Obr. 4-2 Zjednodušené simulační blokové schéma operátora výkonové rovnováhy

#### 4.1. Model regulátorů primární regulace frekvence a sekundární regulace frekvence a výkonu.

Blok *primární a sekundární regulace* představuje jednak automaty zajišťující primární regulaci frekvence, které jsou ve skutečnosti umístěny přímo u každého bloku, poskytujícího tuto podpůrnou službu, a také sekundární regulátor, ve skutečnosti umístěný na dispečinku provozovatele soustavy.

Akční zásah primární regulace frekvence je závislý na odchylce frekvence od jmenovité hodnoty podle rovnice(5.1).

$$\Delta P = -\frac{100 \cdot P_n}{\delta \cdot f_n} \cdot \Delta f$$

kde (5.1)

$\Delta P$  ... požadovaná změna výkonu bloku [MW]

$P_n$  ... nominální výkon bloku [MW]

$\Delta f$  ... odchylka frekvence od zadané hodnoty [Hz]

$\delta$  ... statika primární regulace [%]

$f_n$  ... zadaná frekvence [Hz] (obvykle jmenovitá 50 Hz)

Akční zásah sekundární regulace frekvence a výkonu závisí na odchylce frekvence od jmenovité hodnoty a velikosti odchylky salda výkonu v uzavřené smyčce (tedy odchylce výkonu předávaného přes hranice ČR od plánované hodnoty) podle rovnice(5.2).

$$G = \Delta P + K \cdot \Delta f$$

kde (5.2)

$G$  ... velikost akčního zásahu SR [MW]

$\Delta P$  ... odchylka předávaných výkonů od plánované hodnoty [MW]

$\Delta f$  ... odchylka od jmenovité frekvence [Hz]

$K$  ... parametr [MW/Hz]

Podle rovnic (5.1) resp. (5.2) je PR resp. SR nasazována jak v modelu, tak ve skutečnosti.

## 4.2. Model dispečera výkonové rovnováhy

Tato kapitola je rozdělena na dvě části. V první části jsou popsána pravidla pro aktivaci jednotlivých PpS získaná z kodexu přenosové soustavy [3]. V druhé části je pak současná implementace těchto pravidel v modelu dispečera výkonové rovnováhy.

- Služba *QS* se používá pro pokrývání výpadku velkých bloků, kdy je potřeba splnit kritérium obnovení výkonové rovnováhy do 15 minut po vzniku výpadku.
- *TR* je používána pro nahrazení vyčerpané *SR*. *TR* je ve skutečnosti představována dvěma službami a to *TR+* a *TR-*. *TR+* představuje zvýšení výkonu zatímco *TR-* jeho snížení.
- *DZ* slouží pro pokrývání výkonové nerovnováhy, která vznikla tím, že účastníci trhu se *SE* nejsou dlouhodobě (více než 2 hodiny) schopni dodržet plánované odběrové diagramy.
- *Regulační energie ze zahraničí*, je ve použita v případě, kdy v ES ČR není dostatek regulačního výkonu k doregulování výkonu.

Model dispečera je v blokovém schématu představován bloky *terciární regulace*, *quick start*, *regulační energie do a nad třicet minut*, *havarijní výpomoc* a *dispečerská záloha*. Popis pravidel podle kterých jsou aktivovány jednotlivé PpS v modelu dispečera následuje.

- *Quick start* je aktivován pokud rozdíl  $dP_o$  se *RZSR*, *RZTR+* a *Eregdo30*, překročí mez aktivace. K deaktivaci dojde pokud velikosti *TR* a *Eregdo30* jsou obě menší nebo rovné nule.
- *TR* je aktivována ve třech hladinách. Konkrétní hodnoty jednotlivých hladin jsou určeny podle množství nakoupené *TR*. K aktivaci dojde pokud je predikován výpadek o velikosti větší než polovina *RZSR* a delší než padesát minut. Velikost setpointu při aktivaci je určena podle velikosti setpointu *SR*. K deaktivaci dojde pokud velikost setpointu *SR* klesne pod mez deaktivace, její absolutní hodnota je

menší než absolutní hodnota příslušné meze aktivace. Meze jsou určeny podle RZSR. Meze pro aktivaci a deaktivaci obou regulací jsou symetrické podle nuly.

- *DZ* je aktivována pokud dojde k výpadku nějakého zdroje a je aktivována služba QS. K deaktivaci dojde pokud je setpoint SR menší než nula a není aktivní ani jedna ze služeb QS, TR+, Eregdo30, HV a Eregnad30.

Následující služby jsou v popisu používání PpS výše uvedeny souhrnně jako regulační energie ze zahraničí.

- *Havarijní výpomoc* je aktivována, pokud dojde k výpadku, který nelze pokrýt službou DZ a je aktivní QS. Také musí být tato služba k dispozici. Deaktivována je pokud klesne setpoint SR pod nulu a není aktivní QS, TR+ ani Eregdo30.
- *Regulační energie do třiceti minut* představuje kladnou a zápornou zahraniční regulační energii dostupnou do třiceti minut. Podmínky pro aktivaci i deaktivaci jsou pro kladnou a zápornou regulační energii symetrické. K aktivaci kladné resp. záporné Eregdo30 dojde pokud hodnota setpointu SR překročí mez vypočítanou pomocí přírůstku aktivované regulační energie a RZSR. Pro aktivaci je ještě nutné aby nebyla aktivována opačná regulační energie a také aby dPo měla stejné znaménko jako setpoint SR. Dále musí být regulační energie na zahraničním trhu dostupná. Tato podmínka je simulována náhodně. K deaktivaci dojde pokud setpoint SR překročí mez pro deaktivaci, která je vypočítána podobně jako mez aktivace.
- *Regulační energie nad třicet minut* představuje zahraniční regulační energii dostupnou za dobu delší než třiceti minut. Eregnad30 je aktivována pokud dojde k výpadku, který nelze pokrýt službami DZ a HV a zároveň je aktivován QS. Také musí být tato služba k dispozici, to je simulováno stejně jako v případě Eregdo30. Deaktivována je pokud setpoint SR je menší než nula a zároveň není aktivována TR, HV ani Eregdo30.

Tento model je implementován v Simulinku pomocí vložených funkcí Matlabu. V těchto funkcích jsou implementovány výše zmíněné podmínky pomocí příkazů if/else. Pravidla pro nasazování jednotlivých PpS jsou většinou zadány slovně, což lze pomocí těchto podmínek obtížně implementovat. Podmínky jsou pak velmi složité a nepřehledné.

## 5. Fuzzy modelování

Fuzzy modelování je založeno na teorii fuzzy množin. V klasické teorii množin je funkce příslušnosti k množině dvouhodnotovou funkcí která nabývá hodnot nula, nebo jedna. Prvek do množiny buď patří, nebo nepatří a neexistuje žádná další možnost. Naproti tomu v teorii fuzzy množin funkce příslušnosti nabývá jakýchkoliv hodnot z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Tato funkce pak vyjadřuje jakousi míru příslušnosti k množině. Obdobně jsou definovány množinové operace.

Fuzzy modely se používají u složitých systémů, kde je příliš náročné vytvoření klasického modelu. Jedná se například o nelineární systémy nebo o systémy, které jsou popsány nepřesně pomocí lidských znalostí a je třeba převést do stejného tvaru jako data ze senzorů a matematických modelů.

Pro řešenou úlohu, tedy vytvoření fuzzy modelu dispečera výkonové rovnováhy, se zdá být vhodné fuzzy řešení hned z několika důvodů. Jedná se totiž o řízení velmi složitého systému, jehož chování nelze jednoduše a přesně popsat. Dále se jedná o vytvoření modelu dispečera, jehož znalosti jsou popsány pomocí slovních pravidel. Dispečer také využívá zejména znalostí chování soustavy a neřídí se pouze podle aktuálních hodnot stavových veličin.

### 5.1. Fuzzy systémy

Jádrum fuzzy systému je soubor zkušeností, představovaný souborem *IF-THEN* pravidel. Tento soubor zkušeností se nazývá bázi pravidel. Pomocí báze pravidel je potom ze vstupů systému odvozen jeho výstup.

Jednotlivá pravidla pak mají tvar:

$$IF (\text{předpoklad}) THEN (\text{závěr}) \quad (6.1)$$

Kde hodnota předpokladu je odvozena z hodnoty vstupů systému a pomocí závěru je odvozen výstup systému.

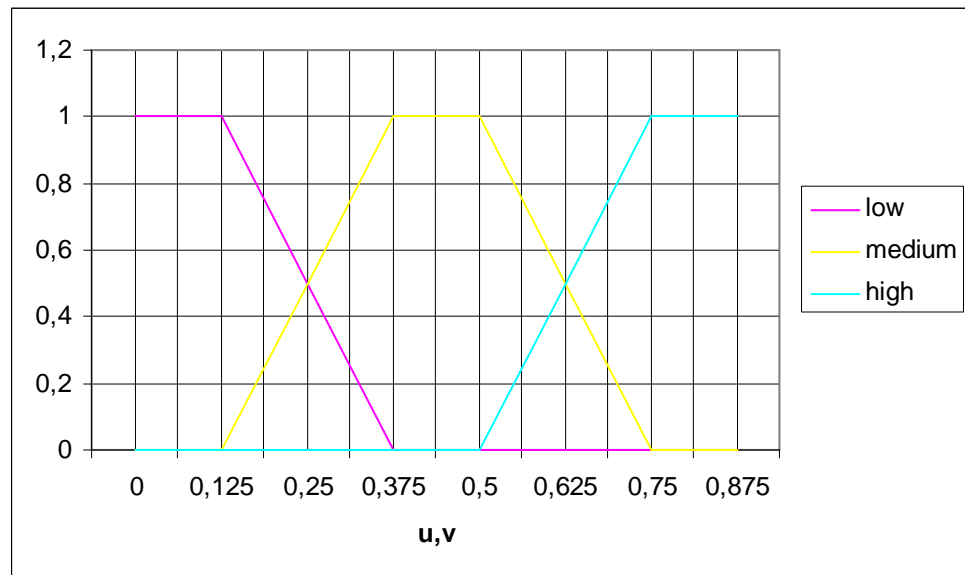
Předpoklad je tvořen jedním nebo několika výrazy které mají tvar např.: *u is low*, kde *u* je vstup systému a *low* je vstupní fuzzy množina. Hodnota takového výrazu je pak rovna

hodnotě příslušnostní funkce množiny *low* v bodě rovném hodnotě *u*. Jednotlivé výrazy jsou pak pomocí fuzzy množinových operací převedeny na jedinou hodnotu. Hodnota celého předpokladu je pak vypočítána z hodnot všech výrazů, které obsahuje, podle T-normy. T-norma definuje způsob výpočtu množinových operací. Mezi nejpoužívanější patří metoda minima, kde je hodnota průniku dána výrazem:

$$j(x,y) = \min(x,y) \quad (6.2)$$

Další používanou metodou je metoda násobení, kde je hodnota průniku dána výrazem:

$$j(x,y) = x \cdot y \quad (6.3)$$



**Obr. 5-1** příslušnostní funkce

Konkrétně pokud bude mít předpoklad tvar:

$$u \text{ is } low \text{ and } v \text{ is } medium \quad (6.4)$$

kde *u* a *v* jsou vstupy systému a *low* a *medium* jsou vstupní fuzzy množiny s příslušnostními funkcemi dle obr. 5-1. Položme *u* = 0,3 a *v* = 0,25. Pak hodnota termu *u is low* je 0,25 a hodnota termu *v is medium* je 0,5. hodnota celého předpokladu se vypočte pomocí zvolené T-normy podle rovnice 6.2 nebo 6.3.

Závěr pravidla je tvořen jednou výstupní fuzzy množinou, zvanou singleton, jejíž příslušnostní funkce splňuje podmínky:

$$\begin{aligned} h(x) &= 1; x = a; a, x \in V \\ h(x) &= 0; x \neq a; a, x \in V \end{aligned} \tag{6.5}$$

kde  $V$  je interval, kde jsou definovány výstupy systému. Míra příslušnosti výstupu k této množině je pak rovna hodnota předpokladu.

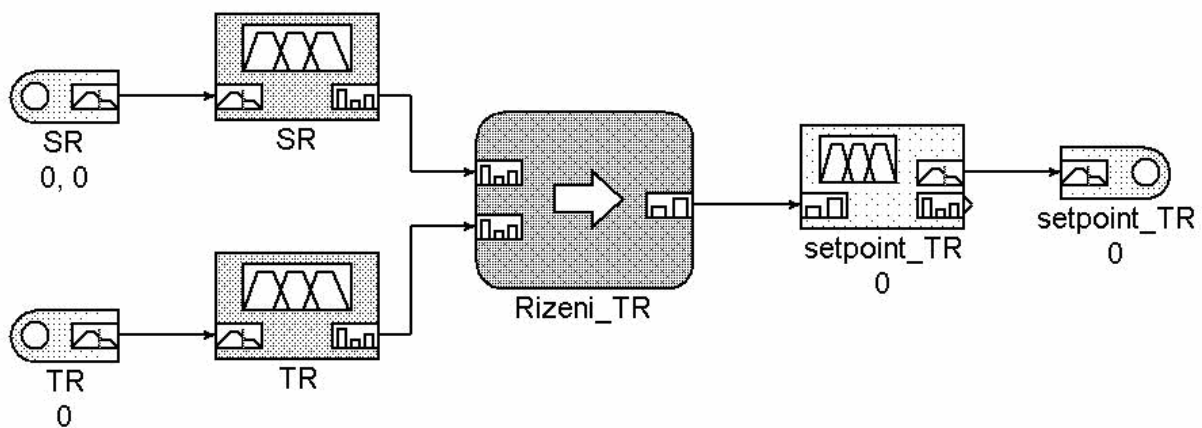
Ze závěrů pravidel a hodnoty jejich předpokladů je pak odvozen výstup celého systému pomocí defuzzifikačních algoritmů. Tyto algoritmy se dělí do dvou skupin. První skupinou jsou metody těžiště, v kterých se různými způsoby počítá průměr z výstupních množin pomocí příslušnosti k nim. Druhou skupinou jsou metody maxima. V těchto metodách se vždy vybere výstupní množina, ke které má výstupní veličina největší míru příslušnosti. Jednotlivé metody z této skupiny se od sebe liší pouze řešením situace, kdy má maximální míru příslušnosti více výstupních množin najednou.

V modelu dispečera výkonové rovnováhy je jako Defuzzifikační algoritmus zvolena metoda nejmenšího maxima, protože jako jediná metoda, implementovaná ve Fuzzy Designeru, splňuje požadavek na aktivaci výstupu po jednotlivých hladinách. Jako T-norma je pak zvolena metoda minima, protože zajišťuje větší míru vybuzení předpokladů.

## 6. Fuzzy Designer

### 6.1. Popis programu

Fuzzy Designer je program umožňující velmi snadnou implementaci fuzzy modelů a regulátorů. Způsob ovládání je podobný jako u programu Simulink. Základem je vytvoření blokového schématu (Obr 7.1.) ze stavebních kamenů. Těmito stavebními kameny jsou: vstupní port, vstupní slovní proměnná, blok pravidel, výstupní slovní proměnná a výstupní port. Program také umožňuje návrh TS fuzzy modelů, o těch se však v této práci nezmiňují. Celý model funguje takto: na vstupní porty jsou načteny čísla, které se fuzzifikují v blocích vstupní slovní proměnná. Dále jsou pak příslušnosti k jednotlivým množinám zpracovány v bloku pravidel, kde jsou vypočítány příslušnosti k výstupním množinám. V bloku výstupní slovní proměnná je pak z příslušností vypočítána výsledná hodnota výstupu.



Obr. 6-1 Příklad blokového schématu

### 6.2. Připojení Fuzzy Designeru k Matlabu

Připojení k Matlabu je uskutečněno pomocí OPC serveru Fuzzy Designeru. K OPC serveru se připojí Matlab COM client. Poté se vytvoří seznam handlerů pro jednotlivé vstupy a výstupy modelu ve Fuzzy Designeru. Během simulace je pak pomocí těchto handlerů zapisováno na vstupy a čteno z výstupů. Bohužel je tato komunikace velmi pomalá a prodlužuje několikanásobně dobu simulace.



## **7. Fuzzy model dispečera pro terciární regulaci**

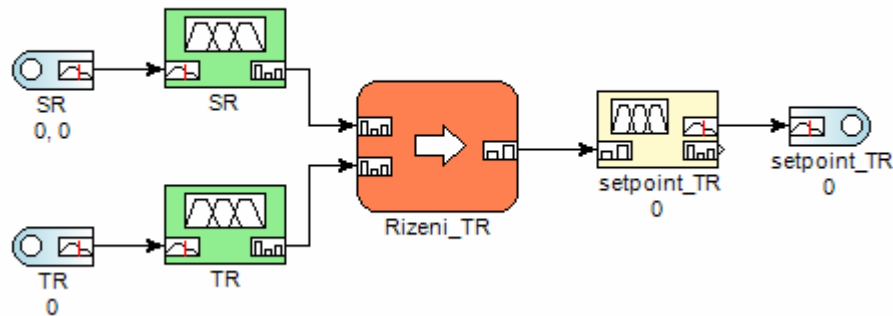
### **7.1. Způsob návrhu**

Při návrhu modelu jsem se nejdříve pokusil vytvořit pravidla podle historických průběhů jednotlivých PpS a dP<sub>o</sub>. Z těchto průběhů jsem zjistil, že k aktivaci dochází tehdy, když akční zásah SR překročí mez rovnou zhruba polovině jejího rozsahu a v této hladině vydrží zhruba hodinu. K deaktivaci dojde pokud se akční zásah SR přiblíží na delší dobu k nule. Velikost setpointu TR je zřejmě úměrná velikosti akčního zásahu SR. Dále zde není patrný rozdíl, tedy kromě znaménka, mezi pravidly pro kladnou a zápornou TR. Budu tedy, pro potřeby modelu, uvažovat tyto dvě různé služby, jako jednu. Pravidlo pro defuzzifikaci vzešlo z požadavku na konstantní hladinu TR. Tomuto požadavku vyhovuje jediná metoda implementovaná ve Fuzzy Designeru a to metoda nejmenšího maxima, která vybere vždy jedno pravidlo. Rozhodl jsem se tedy implementovat takto zjištěná pravidla a upravovat je nebo přidávat další podle dosažených výsledků. Každý model jsem pak porovnával s historickými daty a podle rozdílů jsem navrhoval nová pravidla.

### **7.2. Popis jednotlivých verzí modelu**

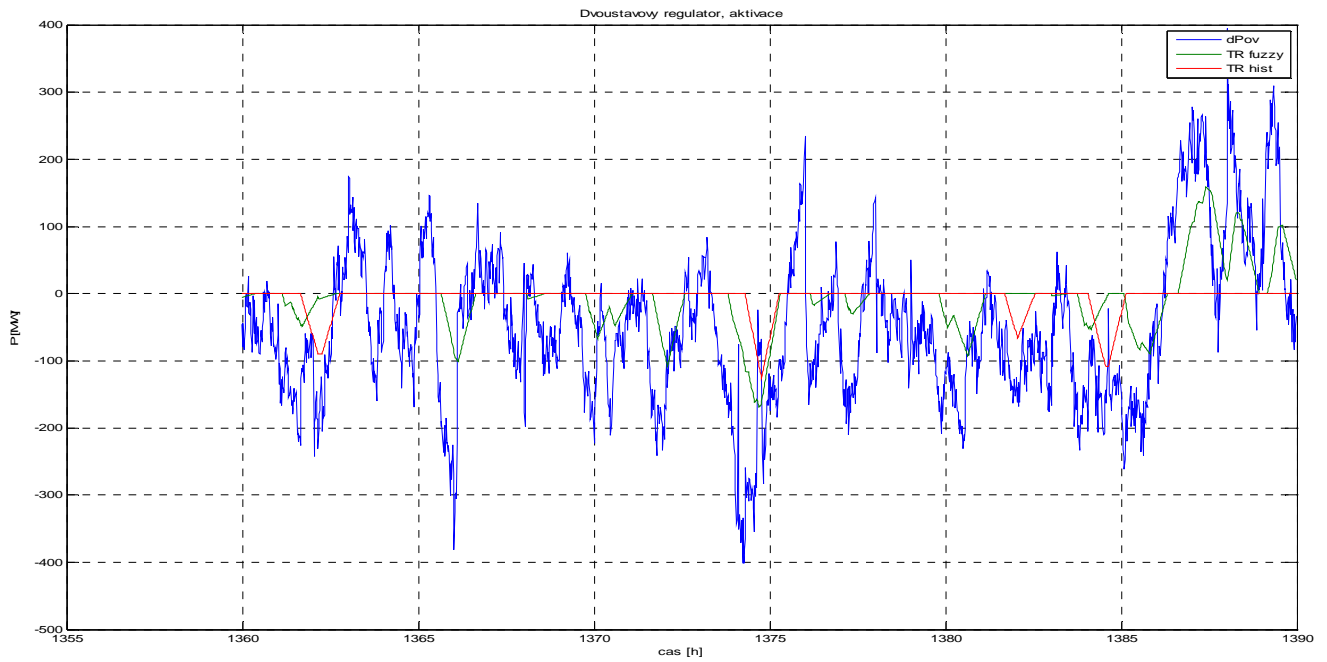
V této podkapitole budou popsány jednotlivé verze modelu, v tom pořadí, v jakém byly navrženy. U každé verze modelu jsou uvedeny tři grafy a jeho blokové schéma ve Fuzzy Designeru. Na grafech je porovnání chování modelu s historickými daty v různých situacích. Na prvním grafu je zachycena běžná nerovnováha, při které byla aktivována TR. Druhý graf ukazuje běžnou nerovnováhu, při které TR nebyla aktivována. Na třetím grafu je zachycen výpadek. Jako data pro porovnání jsou použita data z roku 2005.

## 7.2.1. Dvoustavový model

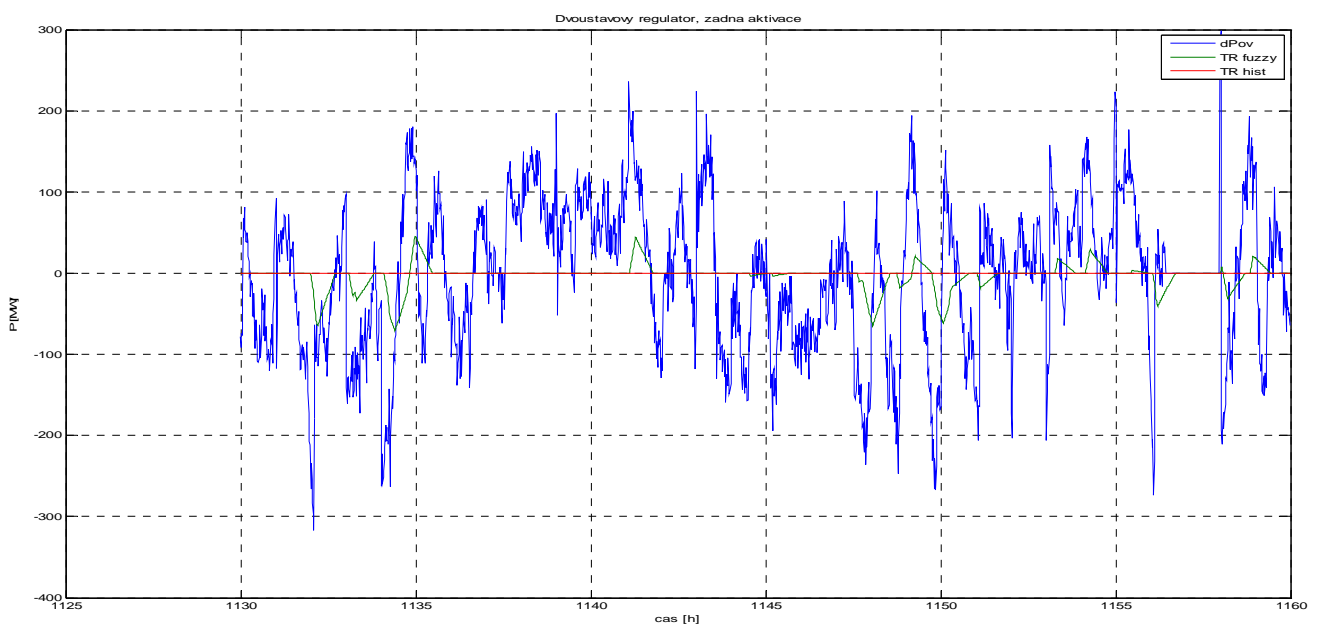


Obr. 7-1 Dvoustavový model - blokové schéma

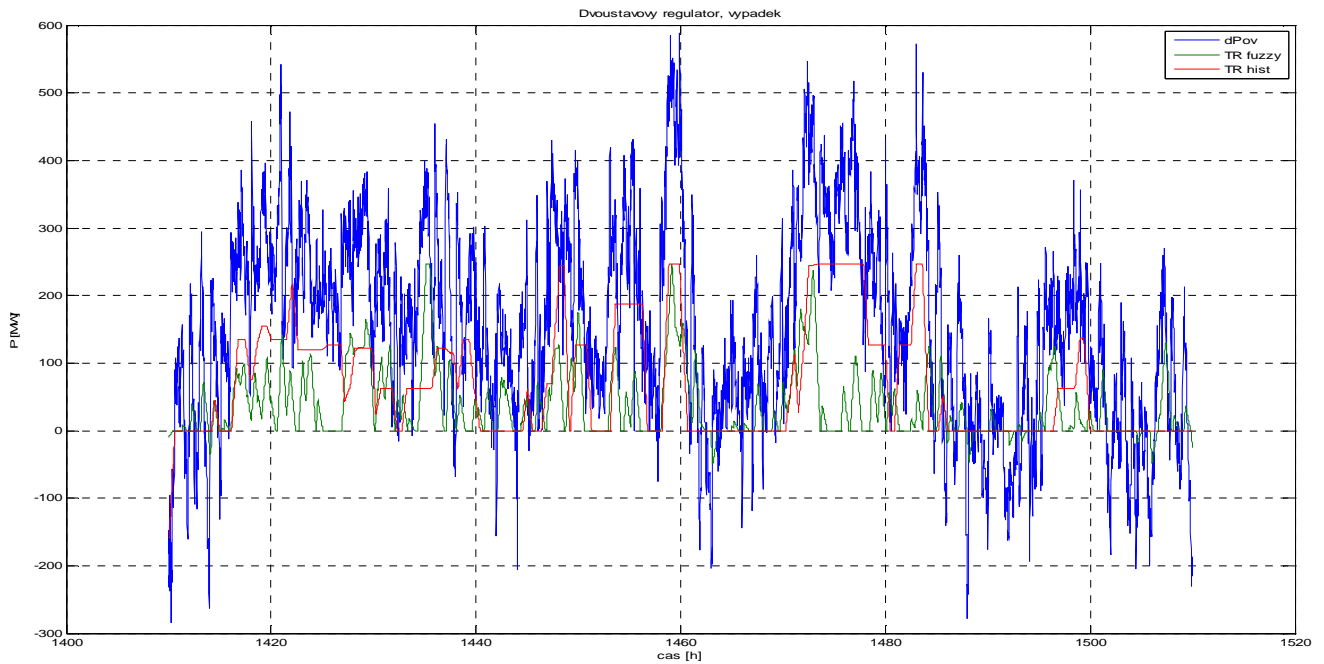
Jako první jsem realizoval model se dvěma nenulovými stavy TR+ a TR-. Model aktivuje TR do poloviny jejího rozsahu, když SR dosáhne poloviny svého rozsahu. Zbytek TR je aktivován, když SR dosáhne asi čtyř pětiny rozsahu. K deaktivaci dojde, když SR klesne pod tyto meze. Na obr. 7-2 je vidět, že při běžné nerovnováze soustavy, kdy došlo podle historických dat k aktivaci TR, model aktivuje TR v těch okamžicích, v kterých došlo k aktivaci TR i ve skutečnosti. Dochází však k aktivaci i v jiných okamžicích, kdy k aktivaci ve skutečnosti nedošlo. Na grafu číslo dvě, tedy v úseku kdy k aktivaci TR ve skutečnosti nedošlo, je vidět, že model aktivuje TR příliš často. Z obr. 7-4 je zřejmé, že k aktivaci dochází ve správných okamžicích, ale pravidla pro deaktivaci nejsou nastavena správně.



**Obr. 7-2 Dvoustavový model - běžná nerovnováha s aktivací TR**

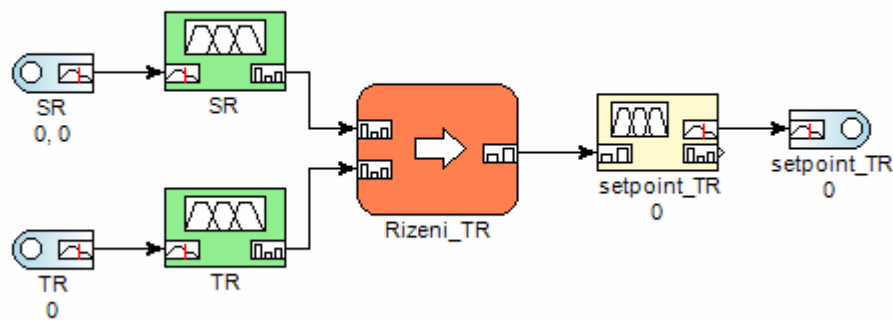


**Obr. 7-3 Dvoustavový model - běžná nerovnováha bez aktivace TR**



Obr. 7-4 Dvoustavový model - výpadek

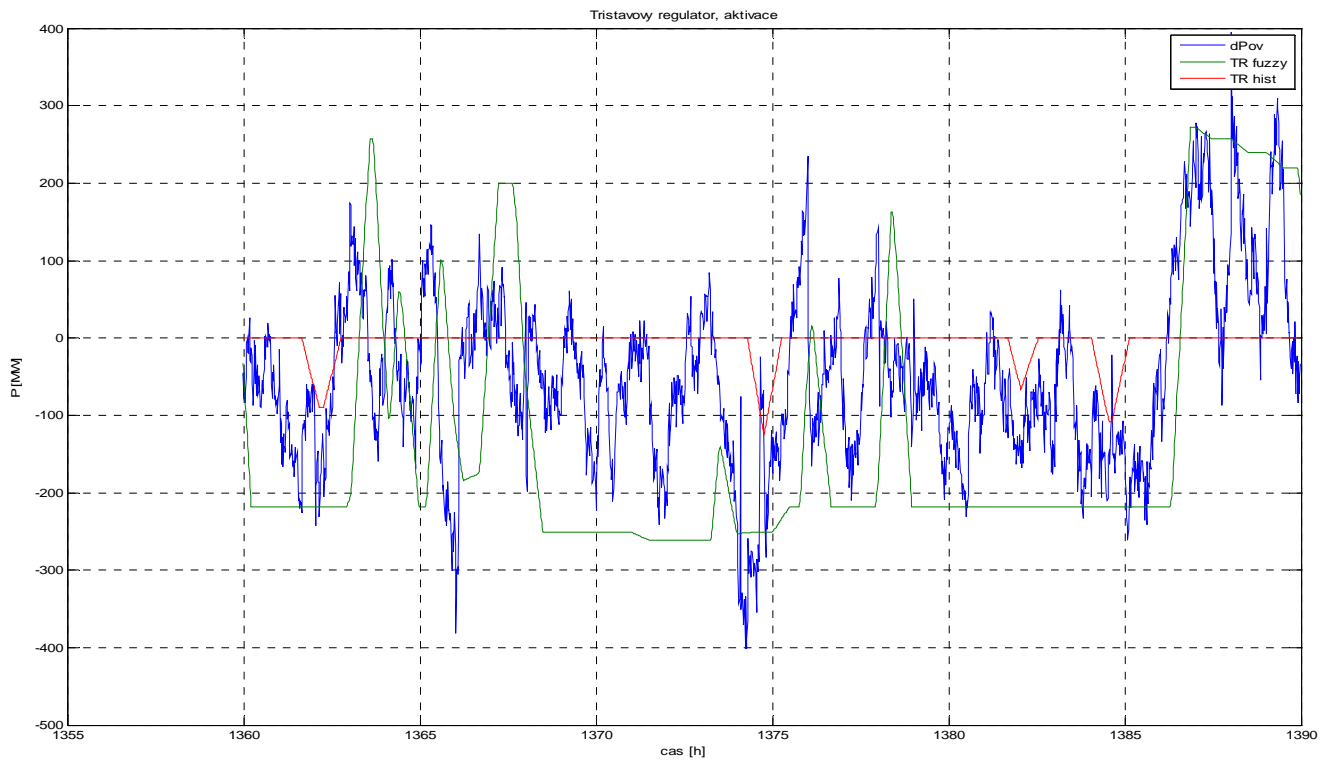
### 7.2.2. Třístavový model



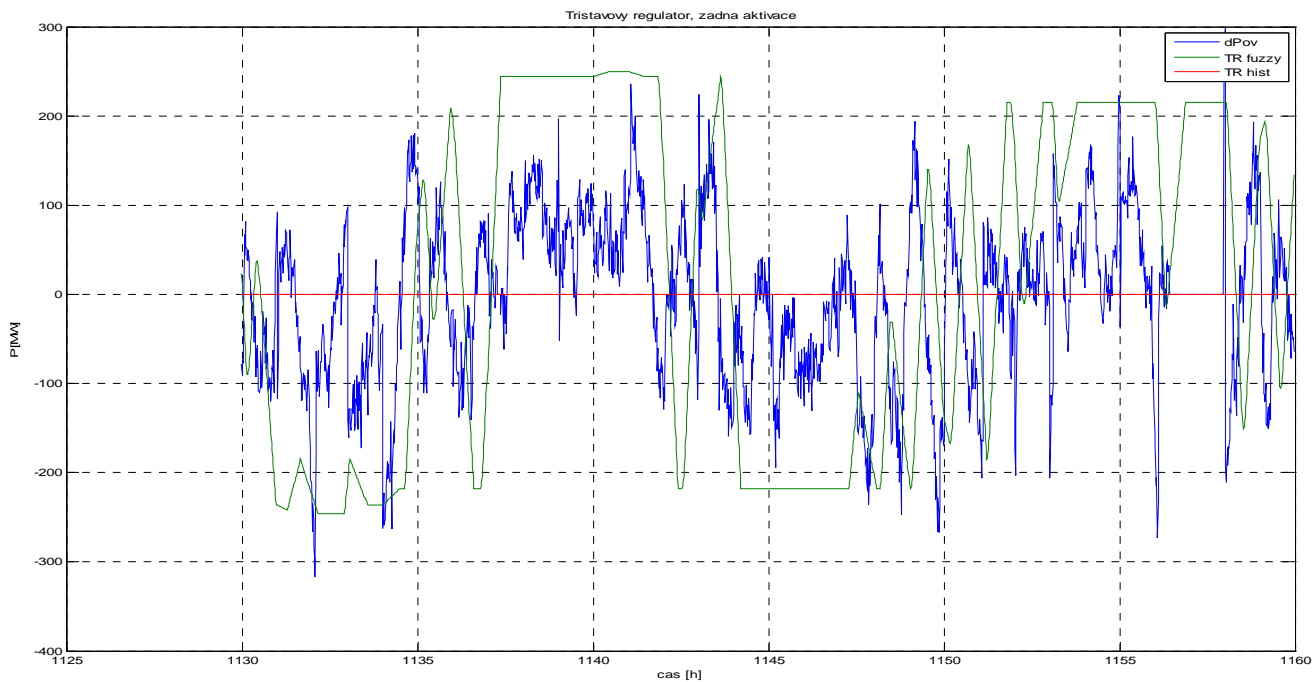
Obr. 7-5 Třístavový model - blokové schéma

Vzhledem k nevhodnosti dvoustavového modelu a charakteru aktivací TR podle historických dat jsem realizoval třístavový model, který se od předchozího modelu liší pouze počtem stavů. Model aktivuje TR do třetiny jejího rozsahu, když SR dosáhne 0,17 svého rozsahu. Dvě třetiny, pokud SR dosáhne 0,47 svého rozsahu a zbytek TR je aktivován, když SR dosáhne asi 0,76 svého rozsahu. K deaktivaci dojde, když SR klesne pod tyto meze. Na obr. 7-6 a 7-5 je vidět, že chování modelu při běžné nerovnováze se podstatně zhoršilo. Při

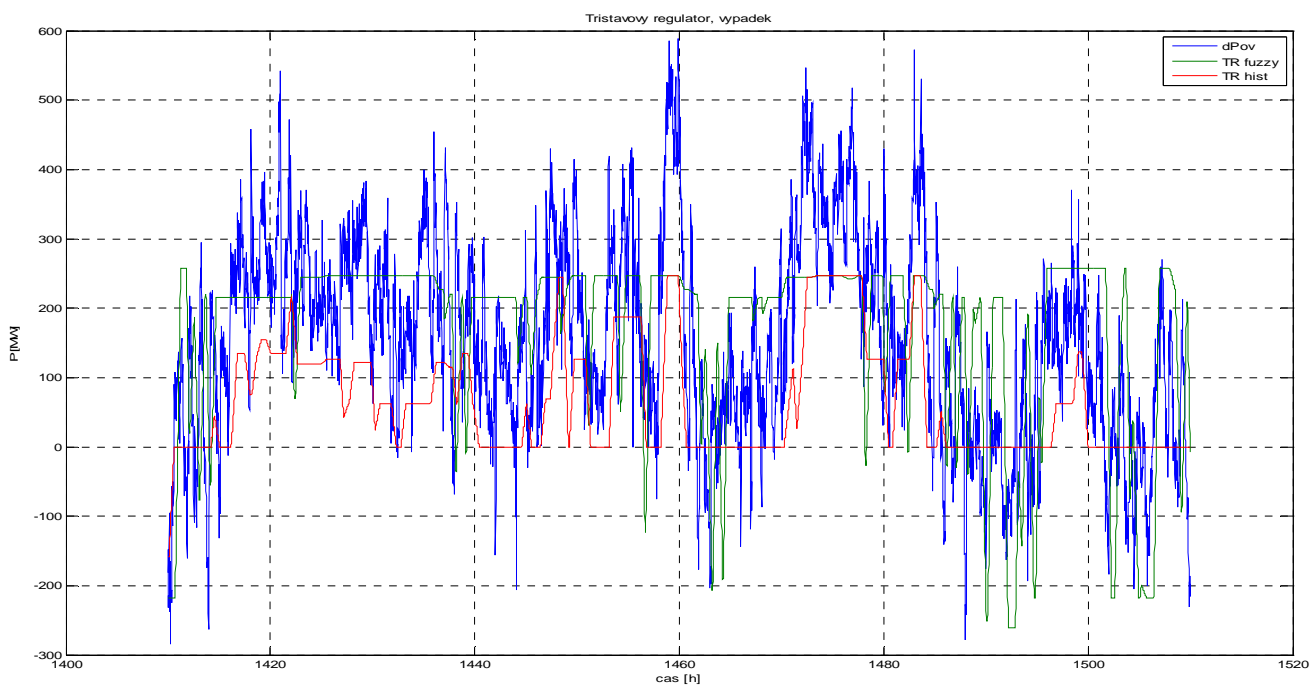
výpadku se chování přiblížilo reálným datům, stále však dochází ke kmitání, které je nežádoucí.



**Obr. 7-6 Třístavový model - běžná nerovnováha s aktivací TR**

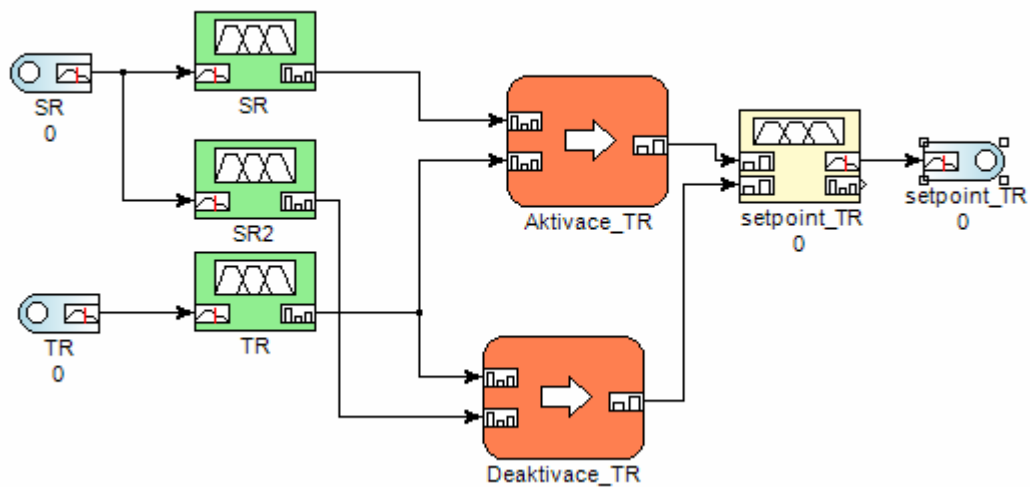


**Obr. 7-7 Tristavový model - běžná nerovnováha bez aktivace TR**



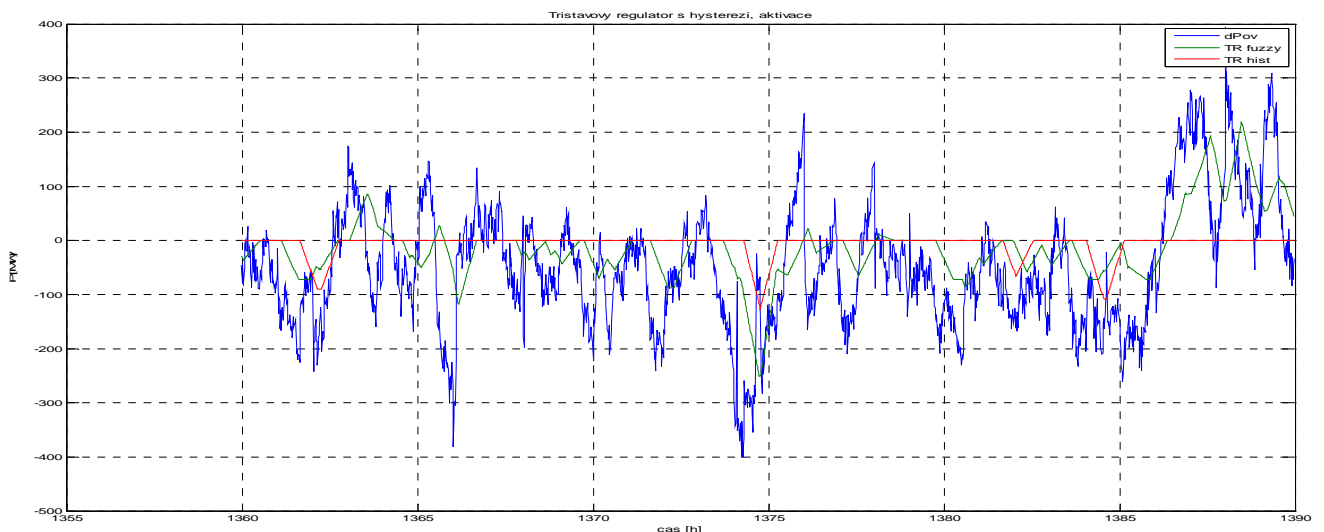
**Obr. 7-8 Tristavový model - výpadek**

### 7.2.3. Třístavový model s hysterezí

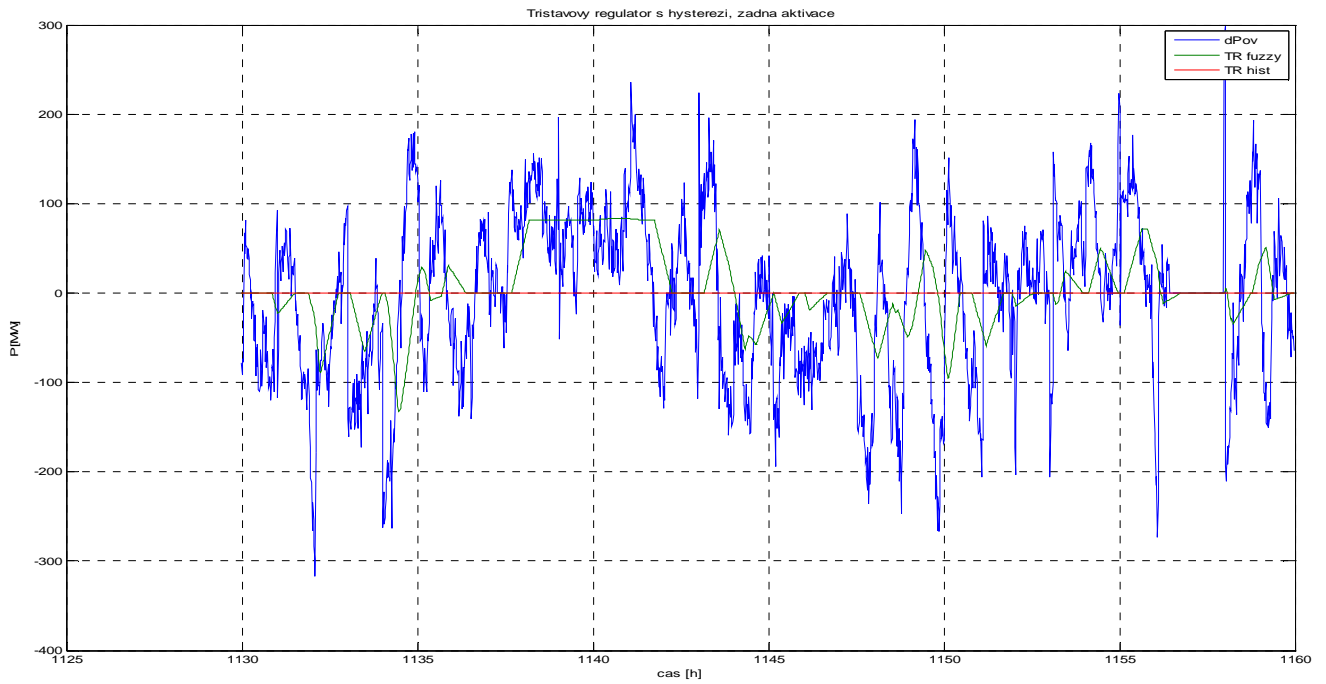


Obr. 7-9 Třístavový model s hysterezí - blokové schéma

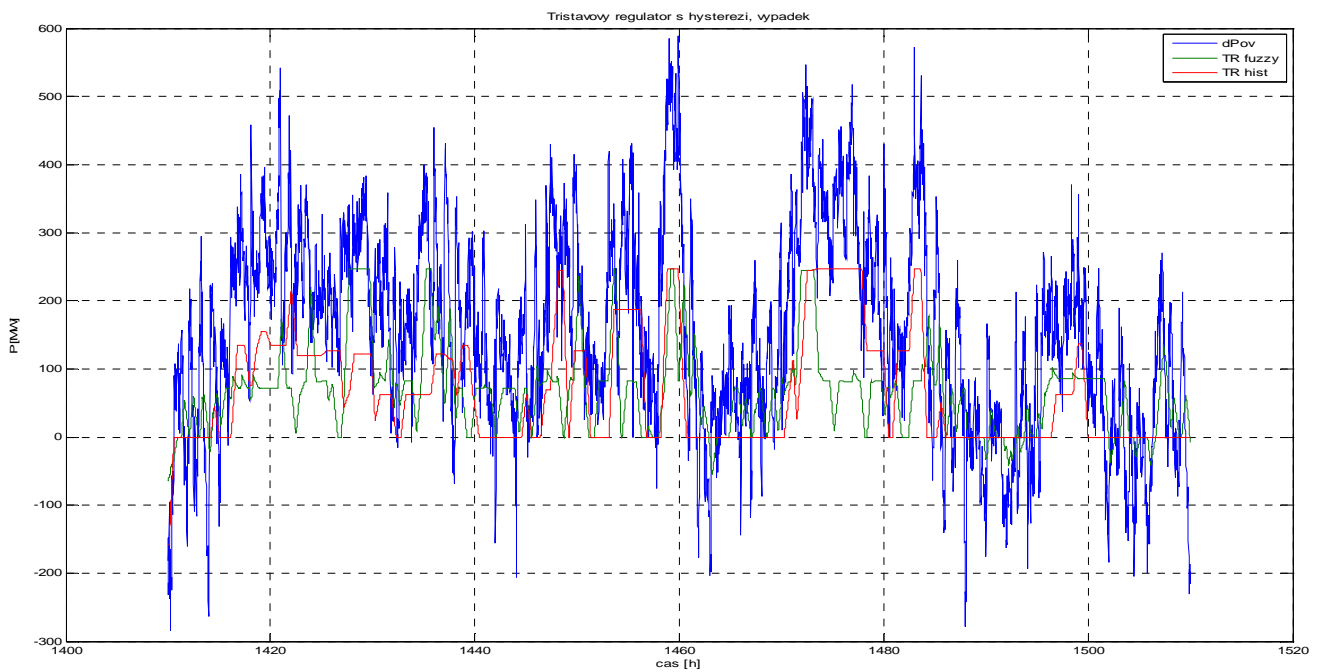
Kmitání TR jsem se pokusil odstranit zavedením hystereze do třístavového modelu. Zavedení hystereze spočívá ve změně mezí pro aktivaci a deaktivaci TR. Meze pro aktivaci jsem změnil na 0,4; 0,78 a 0,92 rozsahu SR. A pro deaktivaci na 0,05; 0,17 a 0,31 rozsahu SR. Na obr. 7-10 a 7-11 je vidět významné přiblížení chování historickým datům oproti minulému modelu. Při výpadku se chování modelu také přiblížilo historickým datům, stále však model není schopen udržet TR na stálé hladině.



Obr. 7-10 Třístavový model s hysterezí - běžná nerovnováha s aktivací TR



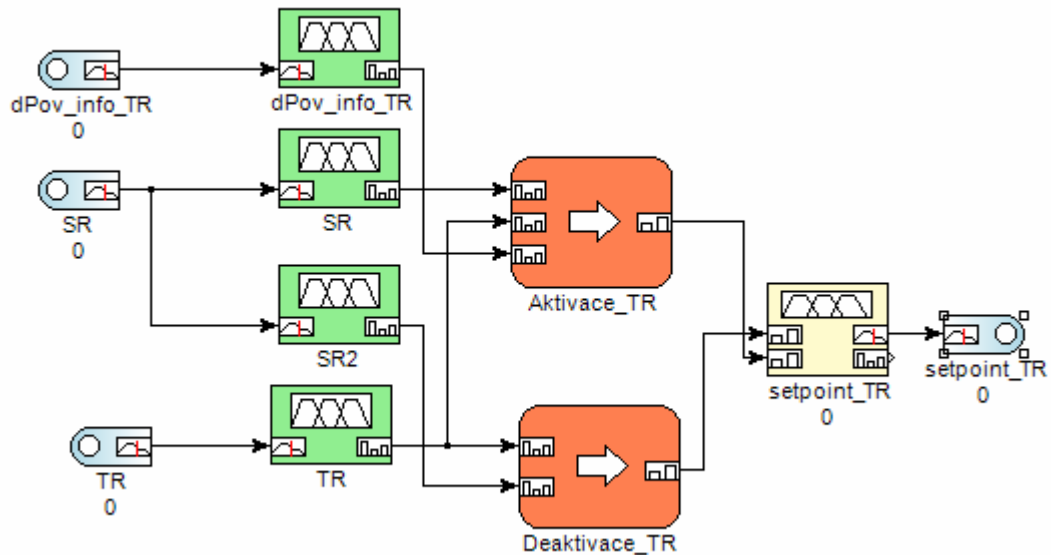
**Obr. 7-11 Třístavový model s hysterezi - běžná nerovnováha bez aktivace TR**



**Obr. 7-12 Třístavový model s hysterezi – výpadek**

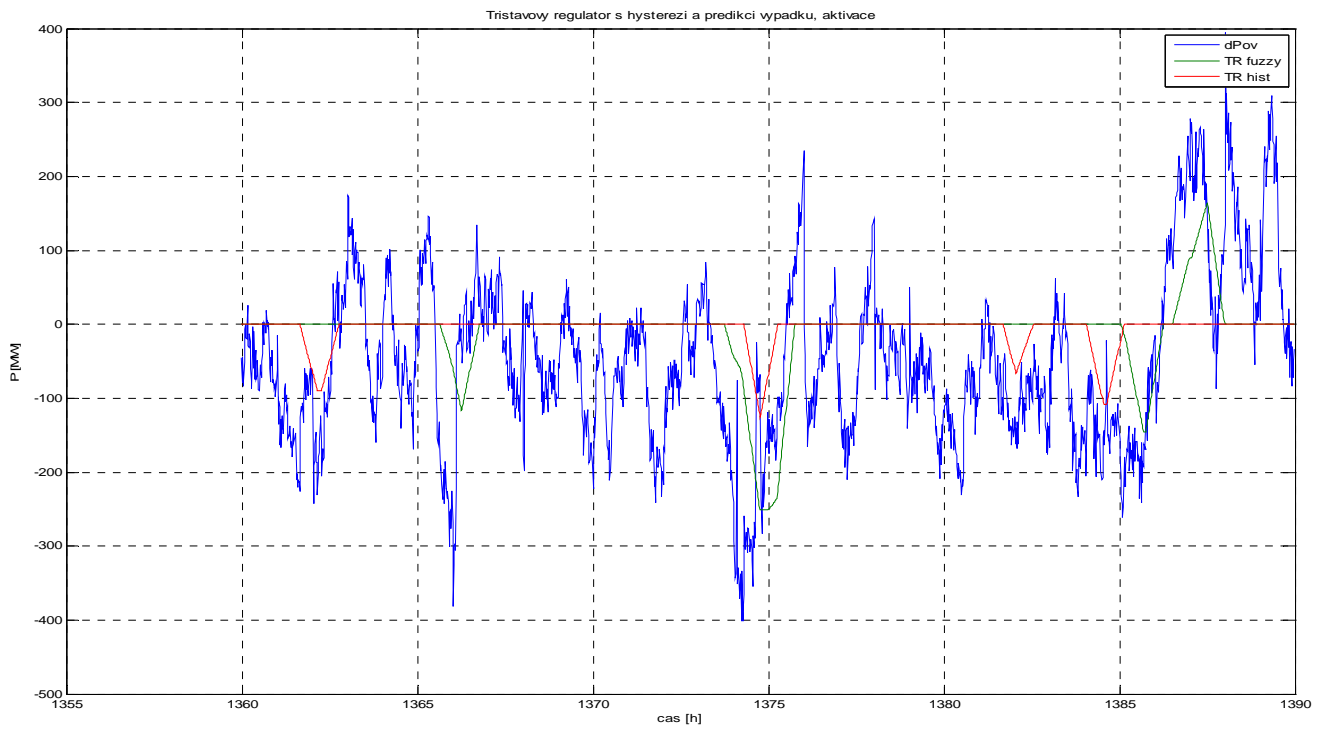


## 7.2.4. Třístavový model s hysterezí a predikcí výpadku

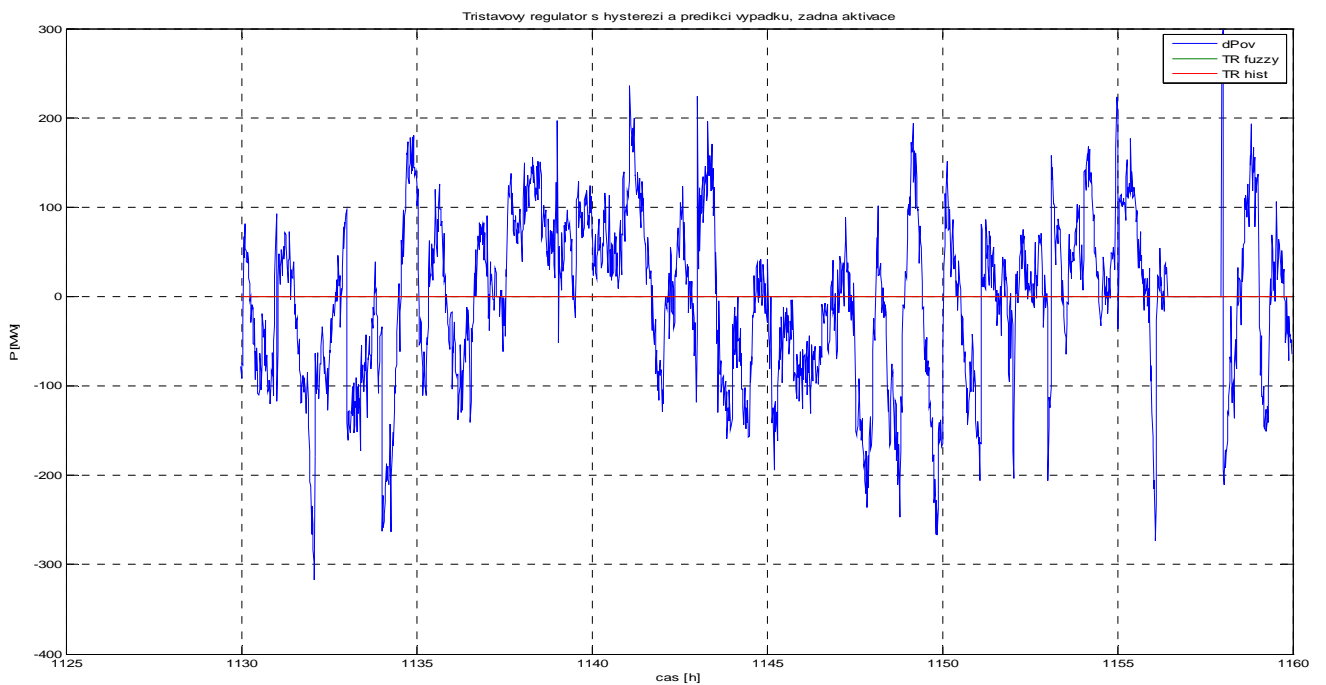


Obr. 7-13 Třístavový model s hysterezí a predikcí výpadku - blokové schéma

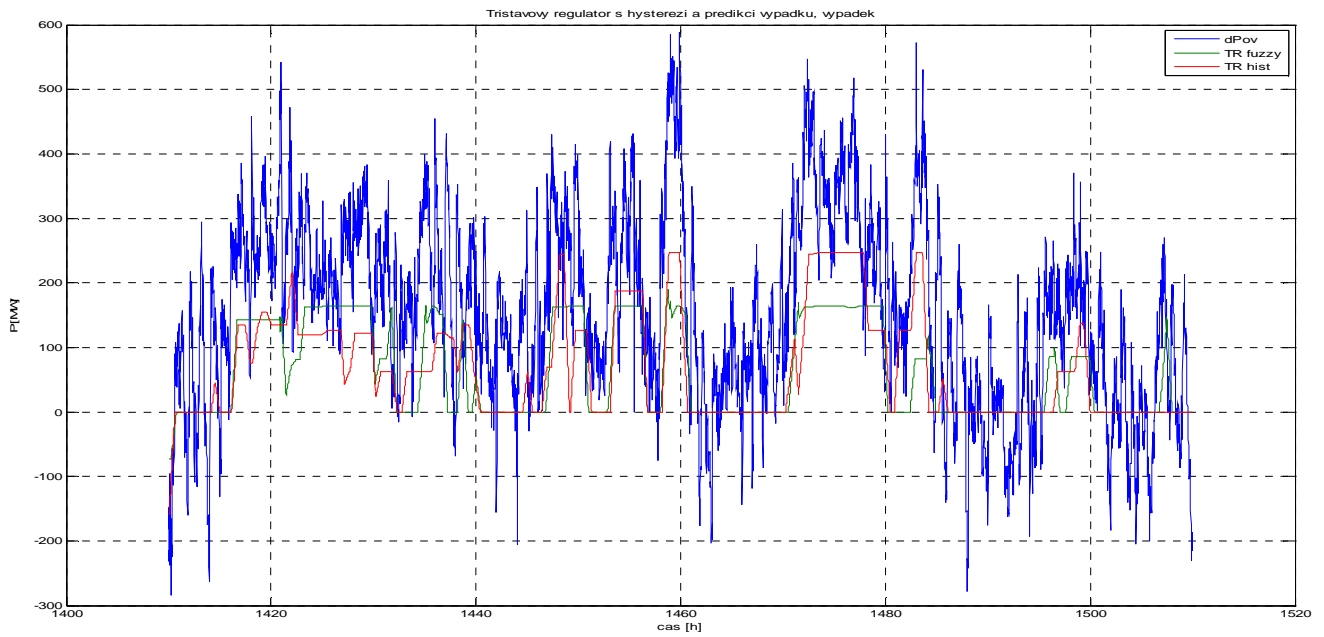
K zamezení aktivace TR při běžné nerovnováze jsem použil predikci výpadku. Tato predikce spočívá v označení úseků, kdy  $abs(SR) > 1/2RZSR$  po dobu delší než 30 minut. Délka těchto úseků byla stanovena experimentálně. TR je pak aktivována pouze v takto označených úsecích. Na obr. 7-14 je vidět, že TR byla správně aktivována pouze v jednom případě, na druhou stranu se velmi snížil počet nesprávných aktivací, což je zřetelné i z obr. 7-15. Při sledovaném výpadku se model chová téměř podle historických dat.



**Obr. 7-14 Třístavový model s hysterezi a predikcí výpadku - běžná nerovnováha s aktivací TR**

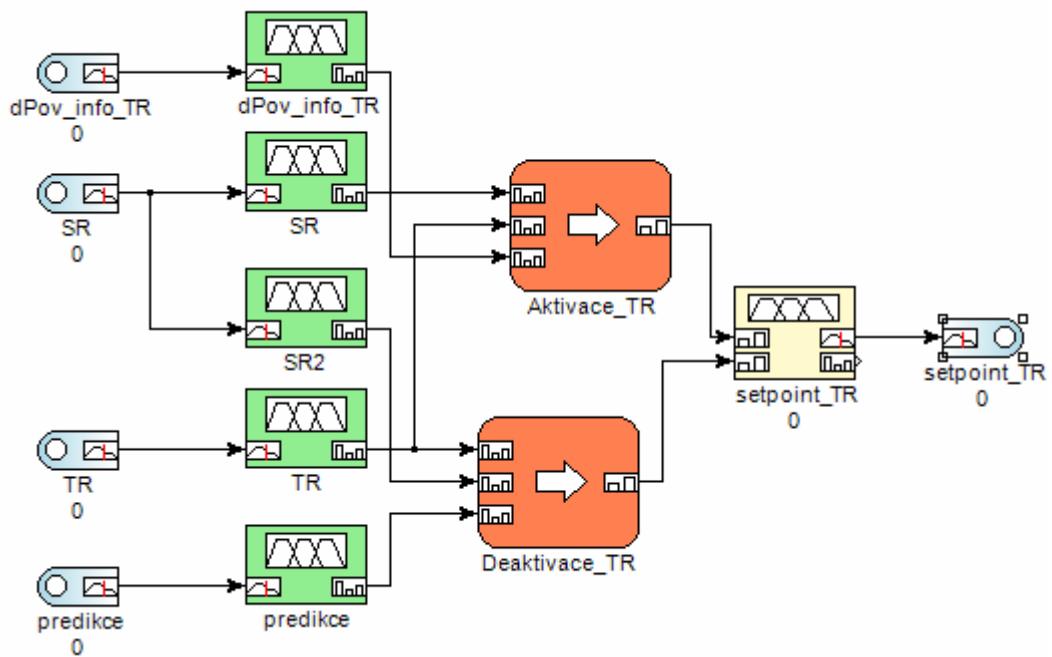


**Obr. 7-15 Třístavový model s hysterezi a predikcí výpadku - běžná nerovnováha bez aktivace TR**



Obr. 7-16 Třístavový model s hysterezí a predikcí výpadku – výpadek

### 7.2.5. Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce



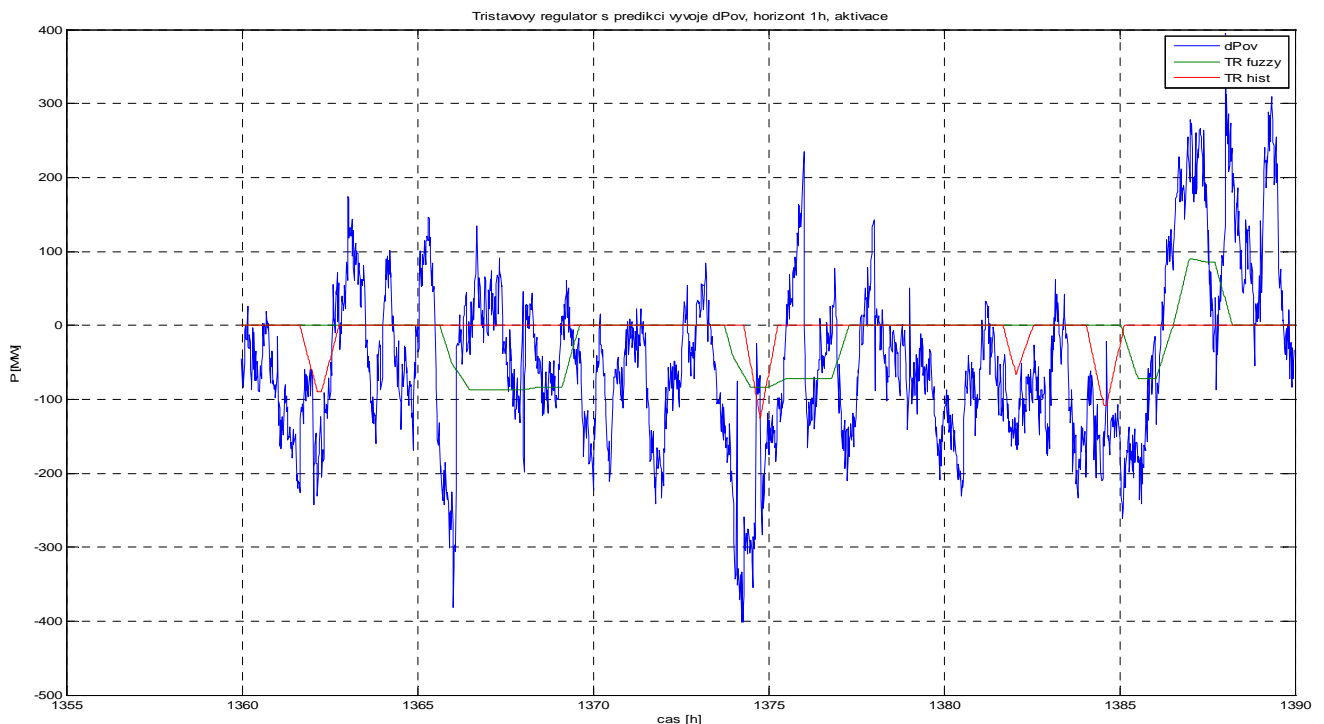
Obr. 7-17 Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce

K předešlé verzi modelu jsem ještě přidal predikci vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce. Ta spočívá v označení všech vzorků v několika následujících hodinách odchylky výkonu v otevřené smyčce jednou z hodnot -1; 0; 1 podle (7.1).

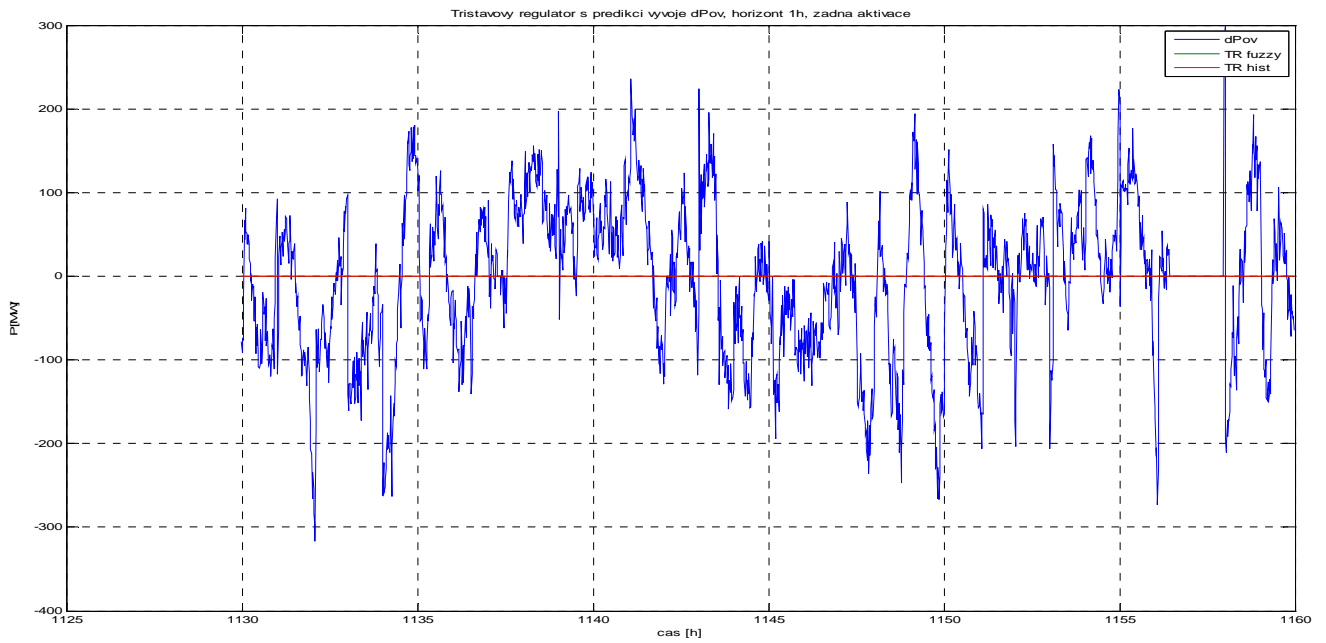
$$\begin{aligned}
 SR > \frac{1}{2} RZSR; x = 1 \\
 -\frac{1}{2} RZSR < SR < \frac{1}{2} RZSR; x = 0 \\
 SR < -\frac{1}{2} RZSR; x = -1
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

Tyto hodnoty se následně sečtou a výsledek představuje predikci vývoje odchylky výkonu. Deaktivace TR pak respektuje tuto predikci, tedy pokud je predikován výpadek, nedojde k deaktivaci. Při aktivaci je použita predikce výpadku jako u předešlého modelu. Predikci jsem použil v jedno, dvou, tří a čtyř hodinovém horizontu.

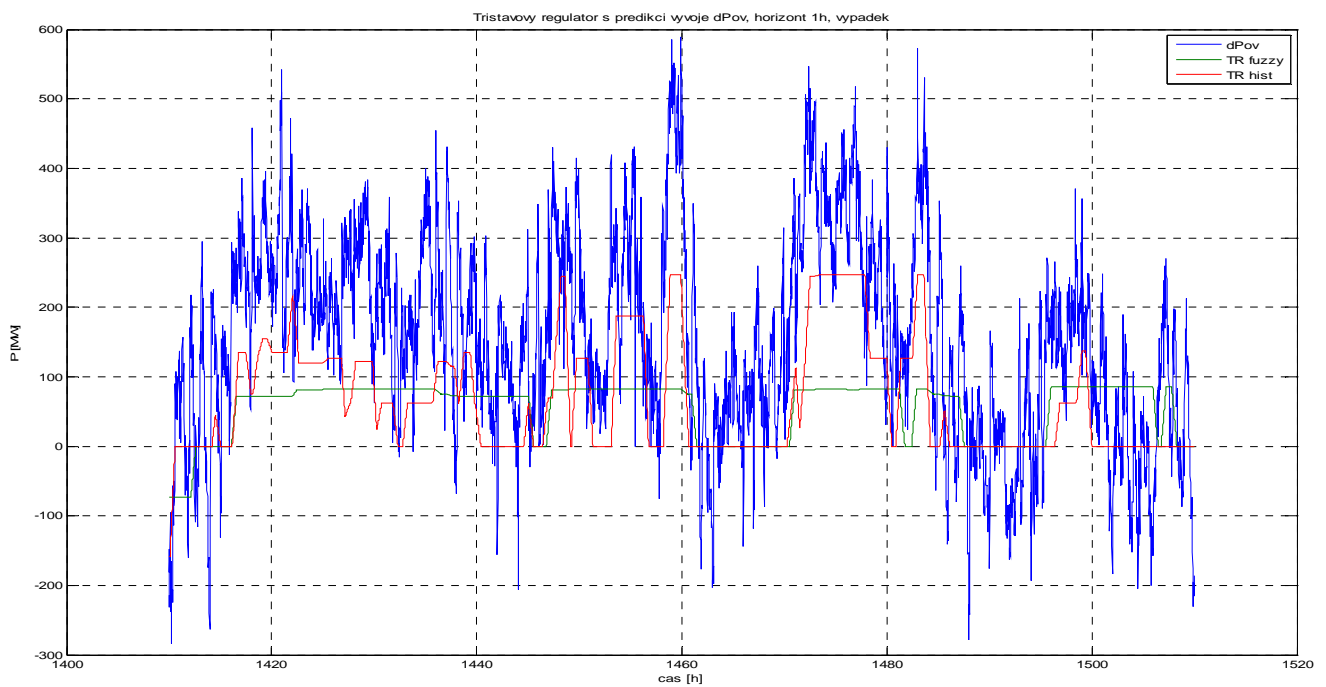
### Jednohodinový horizont predikce



**Obr. 7-18 Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha s aktivací TR**



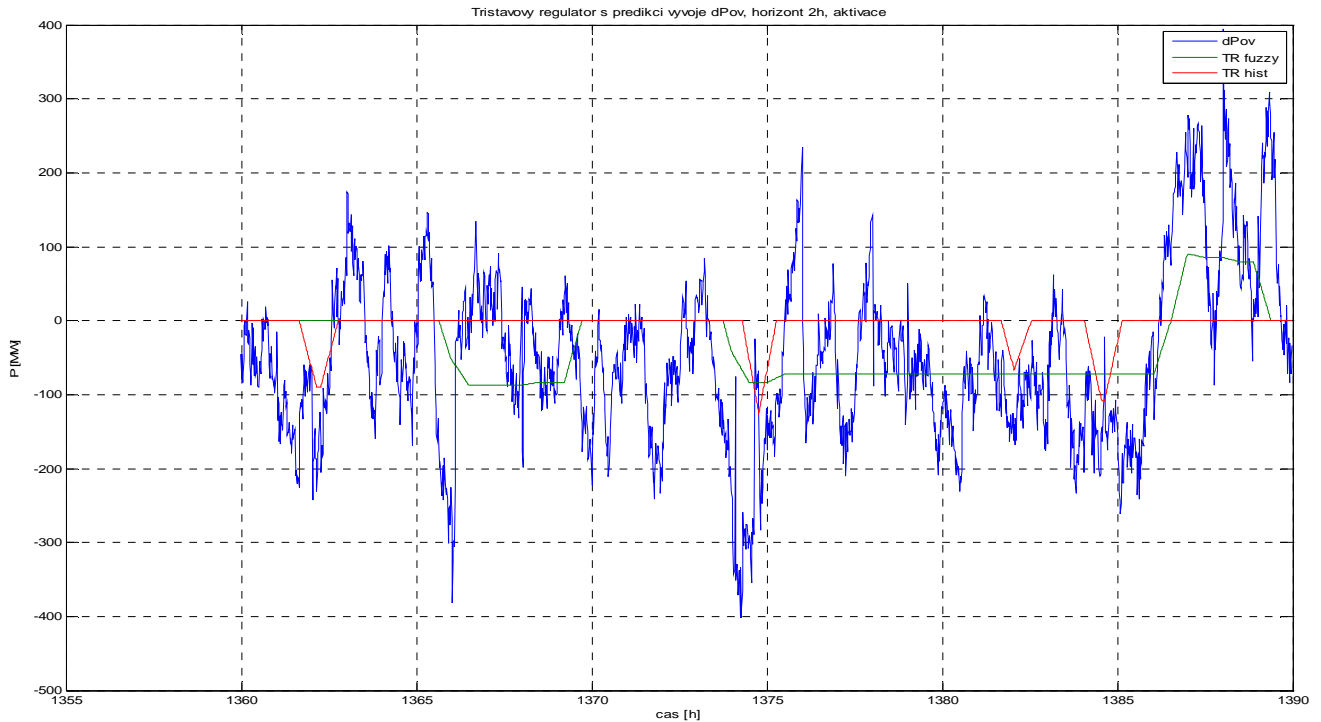
**Obr. 7-19** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha bez aktivace TR



**Obr. 7-20** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce – výpadek

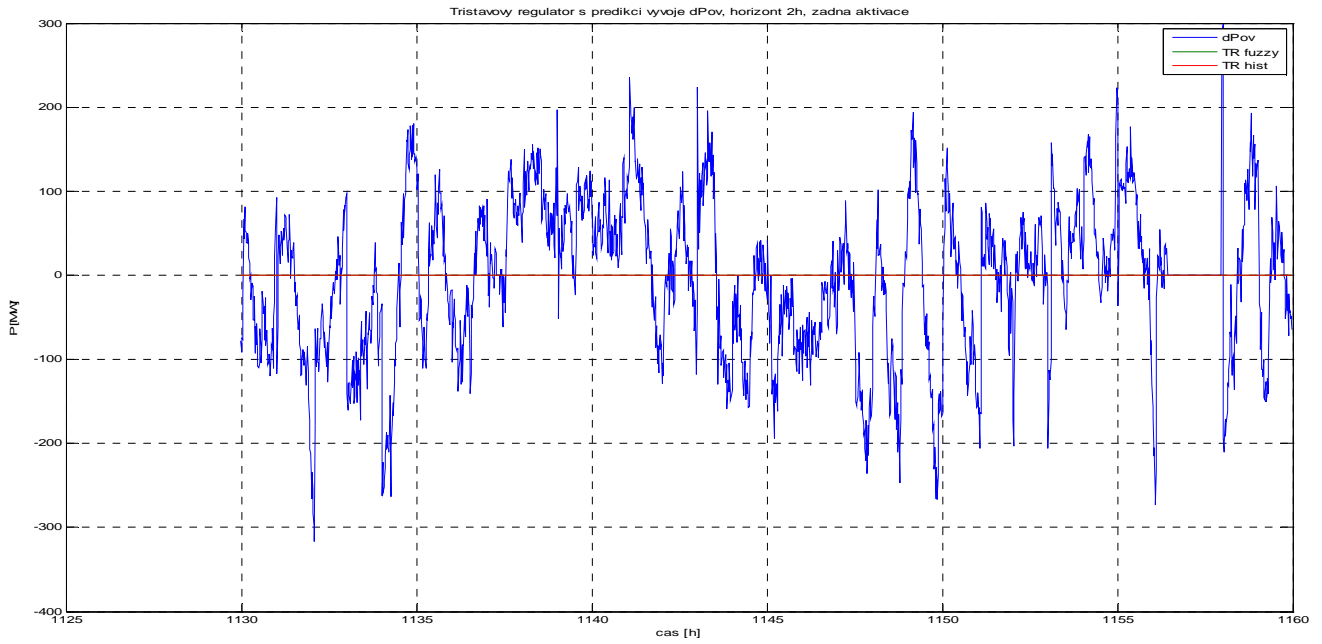
Na obr. 7-17 je vidět, že k aktivaci TR dochází ve stejných okamžicích jako u předešlého modelu. K deaktivaci ale dochází později. Při výpadku se oproti předešlému modelu zvýšila stabilita.

### Dvouhodinový horizont predikce

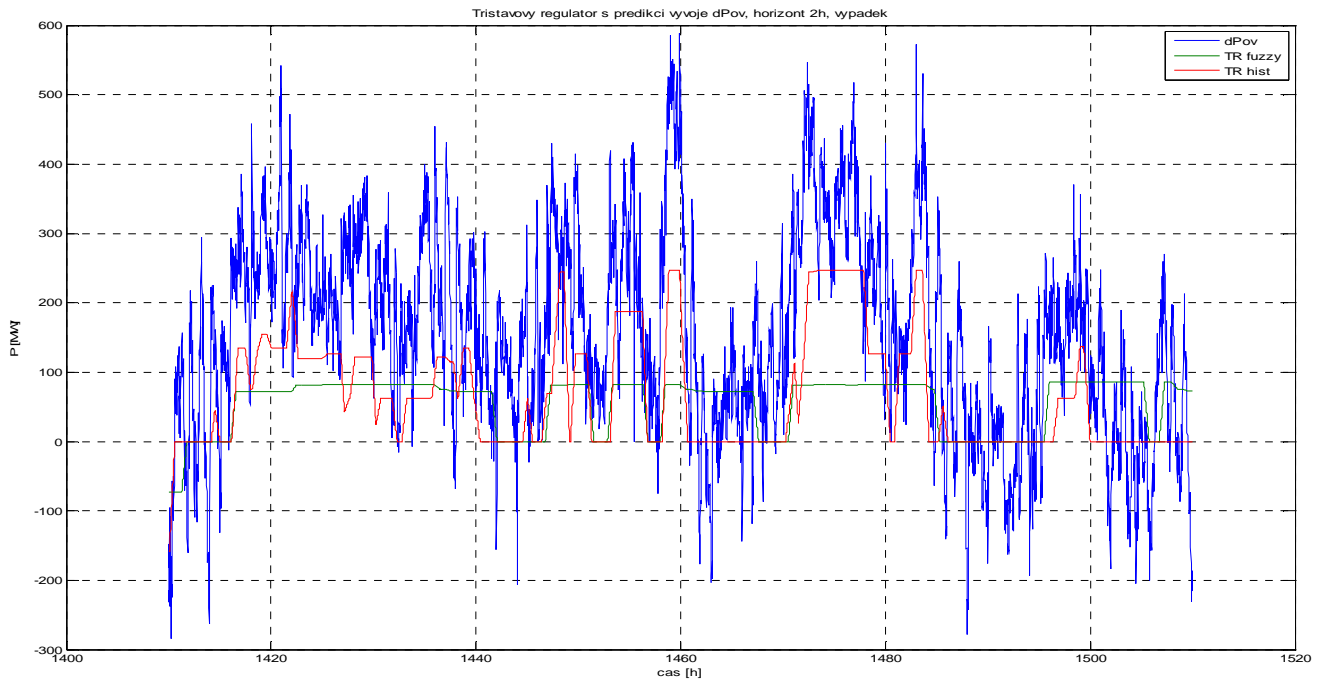


**Obr. 7-21** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha s aktivací TR

Při běžné nerovnováze se ještě prodloužila doba, po kterou je TR aktivována. Při výpadku se chování modelu příliš nezměnilo, jak je vidět na obr. 7-21.

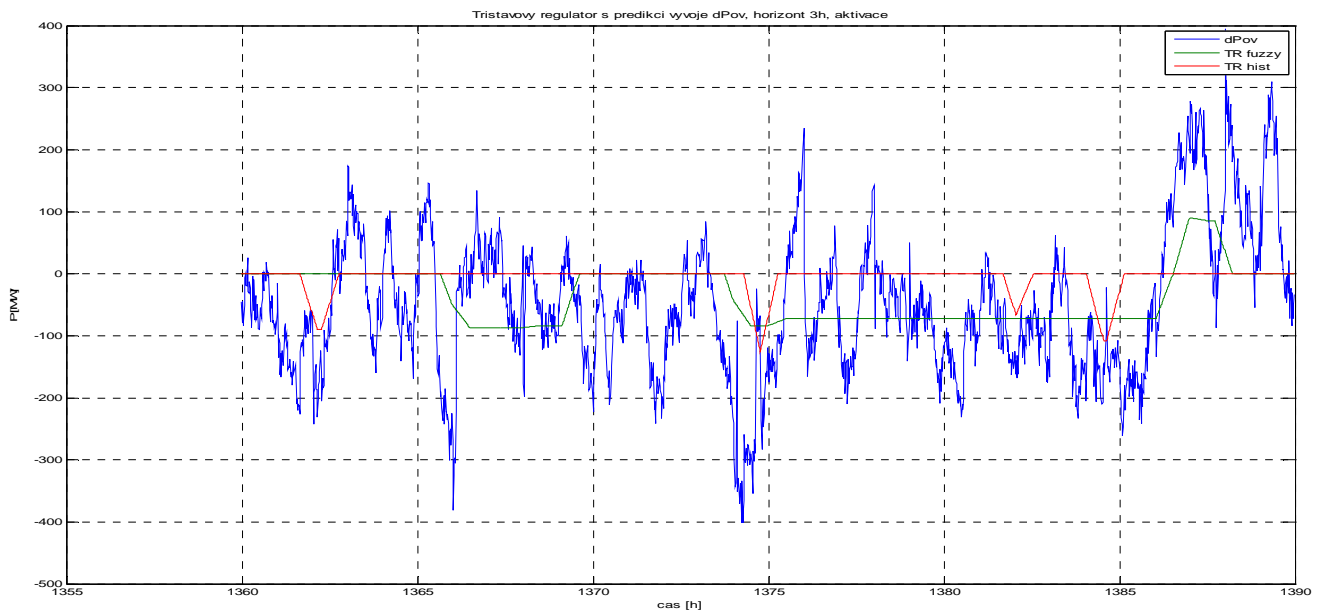


**Obr. 7-22** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha bez aktivace TR

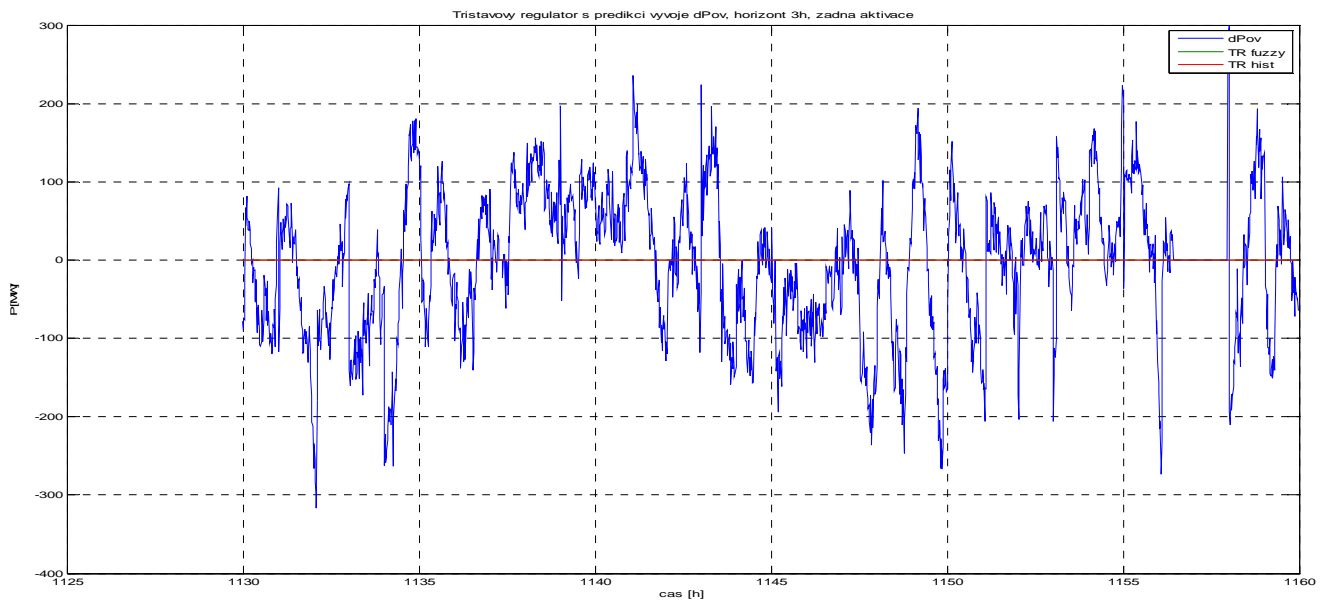


**Obr. 7-23** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - výpadek

## Tříhodinový horizont predikce

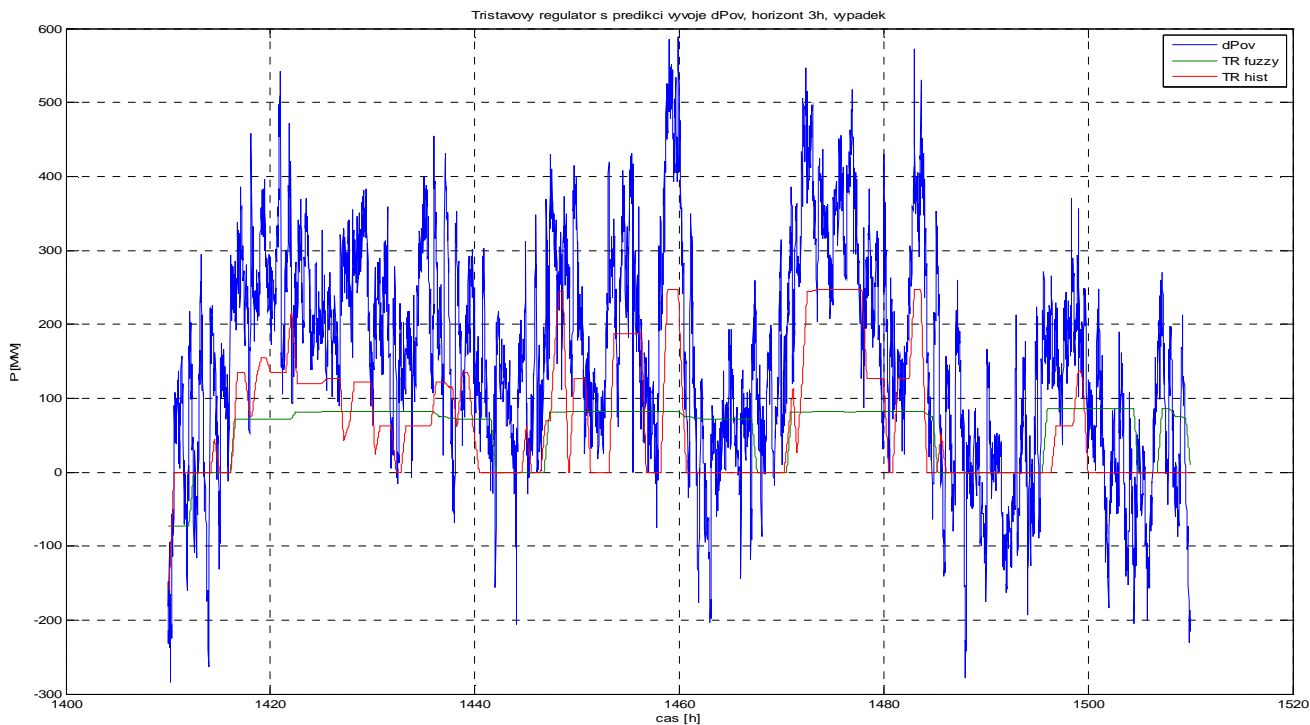


**Obr. 7-24** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha s aktivací TR



**Obr. 7-25** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha bez aktivace TR



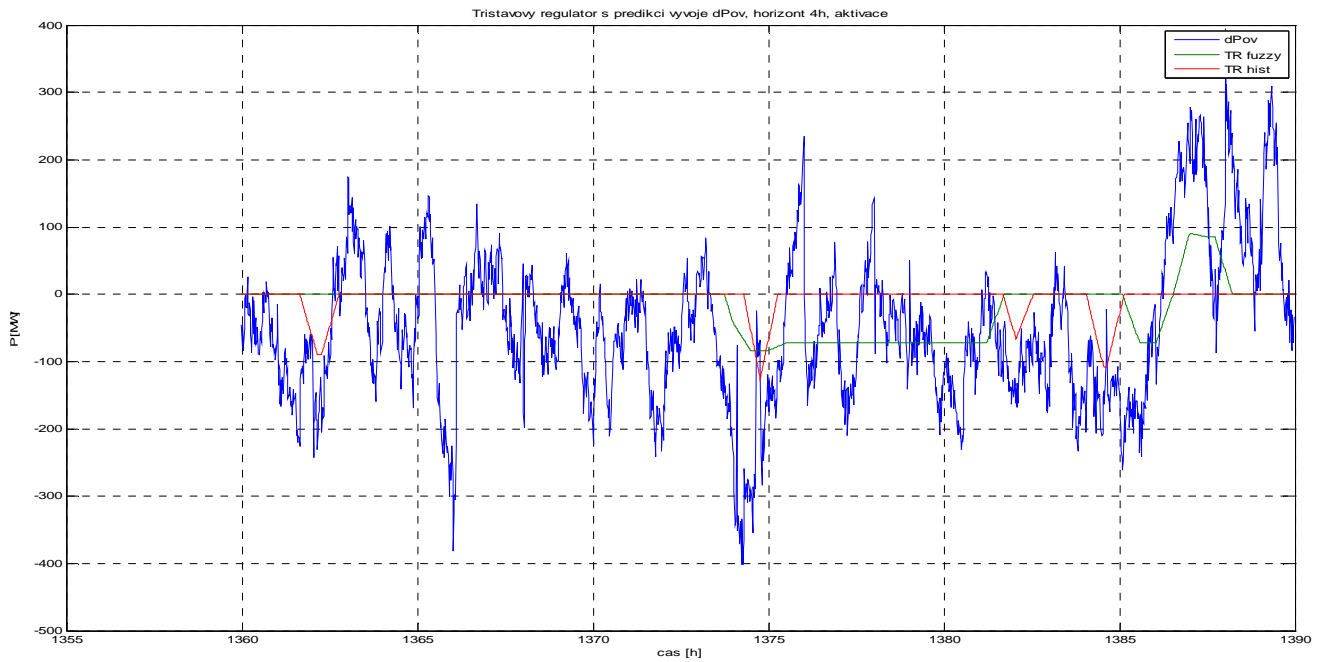


**Obr. 7-26 Třístavový model s predikcí vývoje odchyšky výkonu v otevřené smyčce – výpadek**

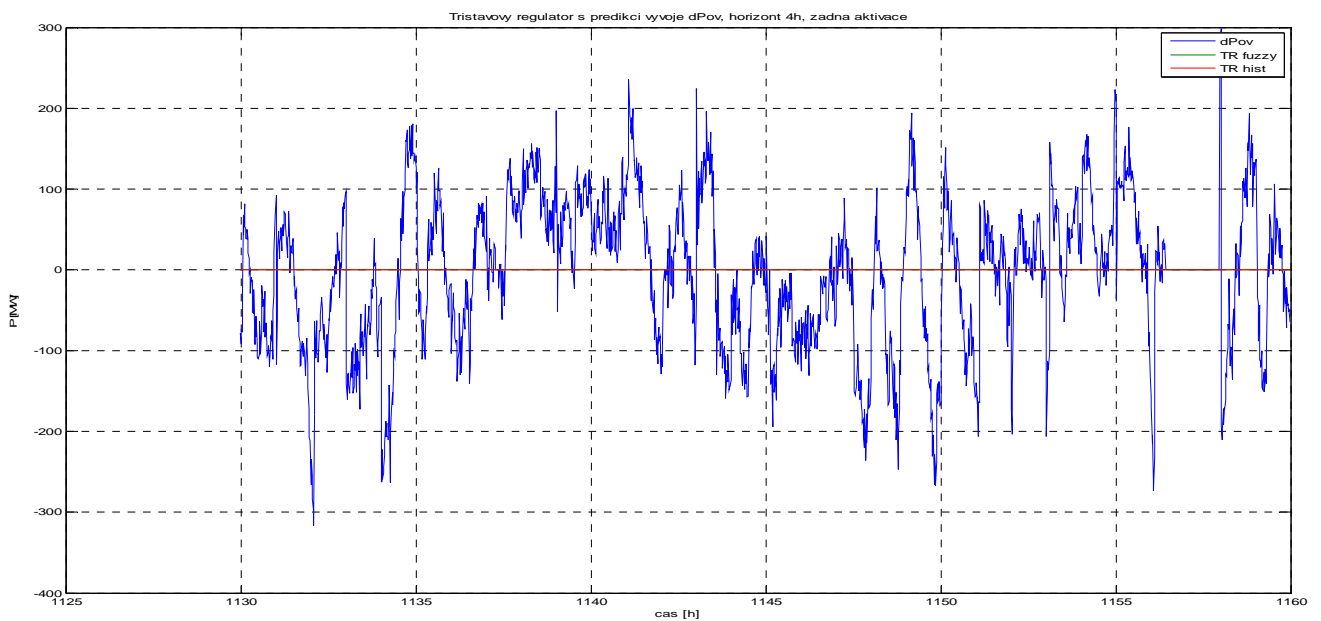
Při běžné nerovnováze se chování modelu s tříhodinovým horizontem predikce oproti dvouhodinovému horizontu nezměnilo. Při výpadku se TR nedeaktivuje tak často jako při dvouhodinovém horizontu predikce.

### Čtyřhodinový horizont predikce

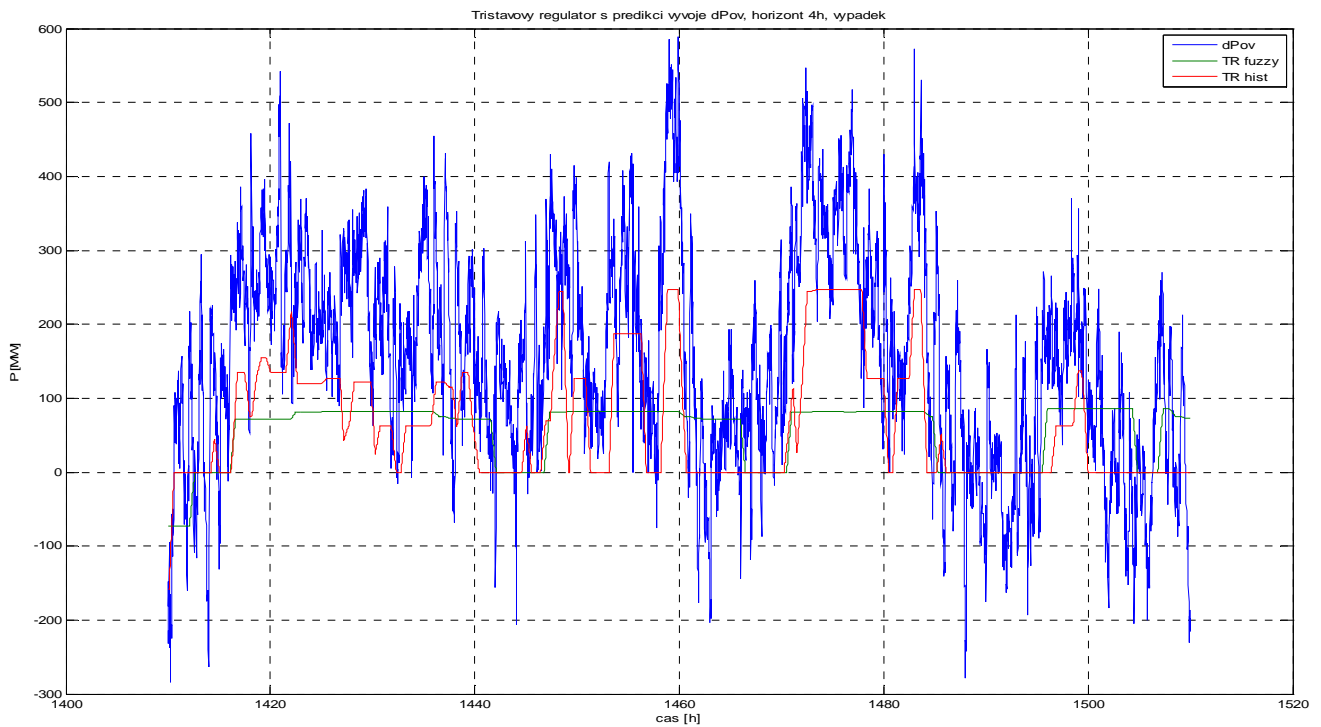
Při běžné nerovnováze se oproti dvou a tří hodinovému horizontu predikce zkrátila doba po kterou je TR aktivována. Při výpadku se chování modelu nezměnilo.



**Obr. 7-27** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha s aktivací TR

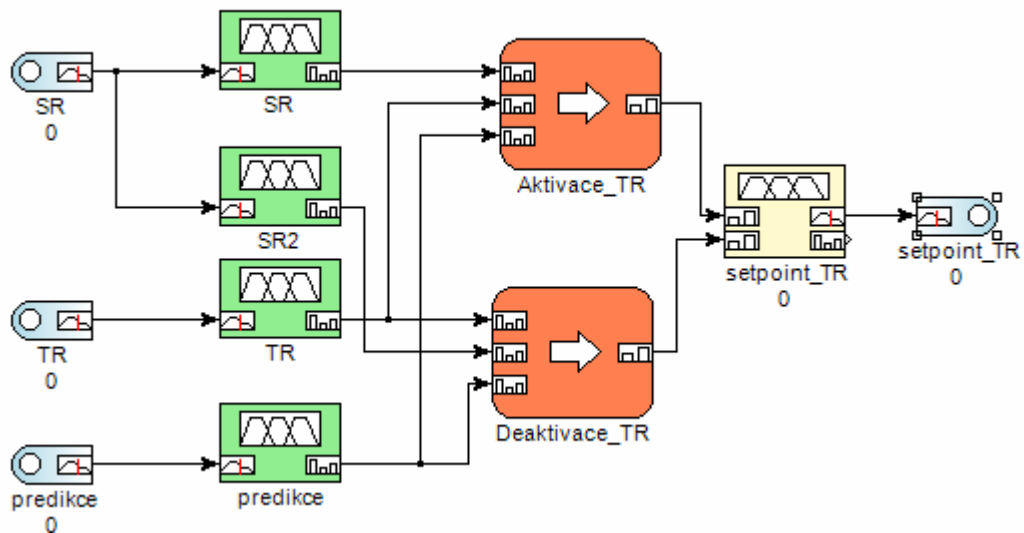


**Obr. 7-28** Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - běžná nerovnováha bez aktivace TR



Obr. 7-29 Třístavový model s predikcí vývoje odchyly výkonu v otevřené smyčce – výpadek

### 7.2.6. Model s predikcí vývoje odchyly energie



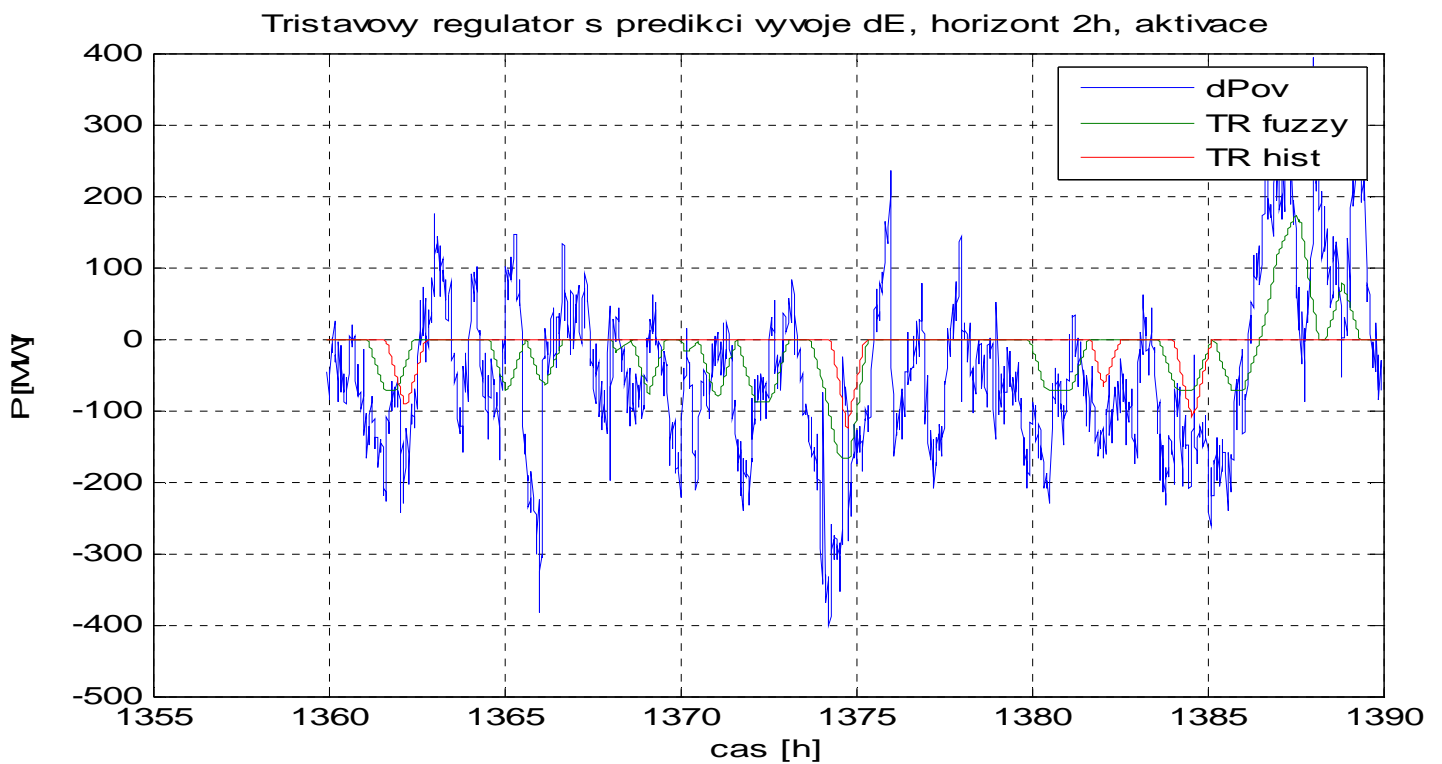
Obr. 7-30 Model s predikcí vývoje odchyly energie

Jako predikce chování soustavy jsem zde použil trend vývoje odchyly energie v otevřené smyčce. Nejdříve je vypočítána odchylka energie v následujících čtvrthodinách.

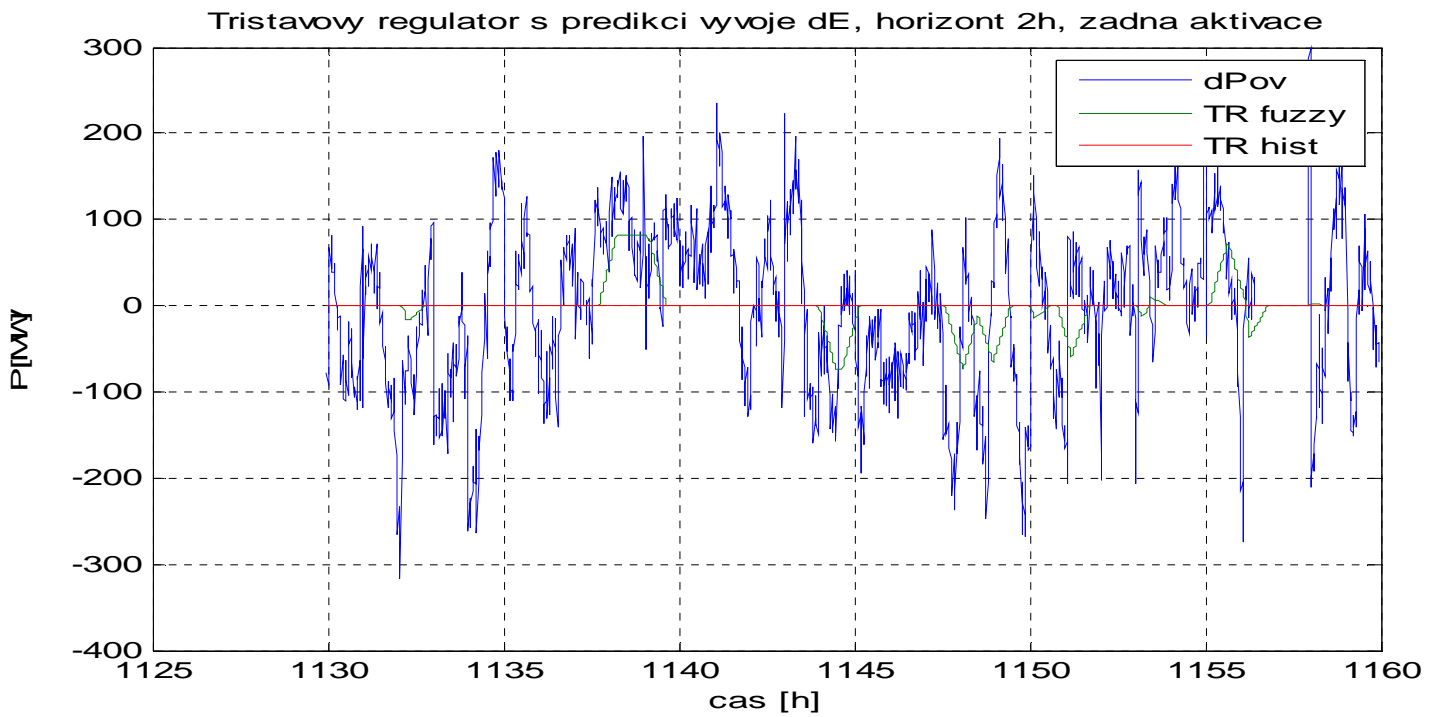
Počet čtvrt hodin je závislý na horizontu predikce. Pak jsou tyto hodnoty proloženy přímkou pomocí metody nejmenších čtverců. Jako predikce je pak použita směrnice této přímky. Tato predikce je použita pro aktivaci i deaktivaci TR. Ta není aktivována pokud není predikován výpadek a naopak nedojde k deaktivaci pokud výpadek je predikován.

### Dvouhodinový horizont predikce

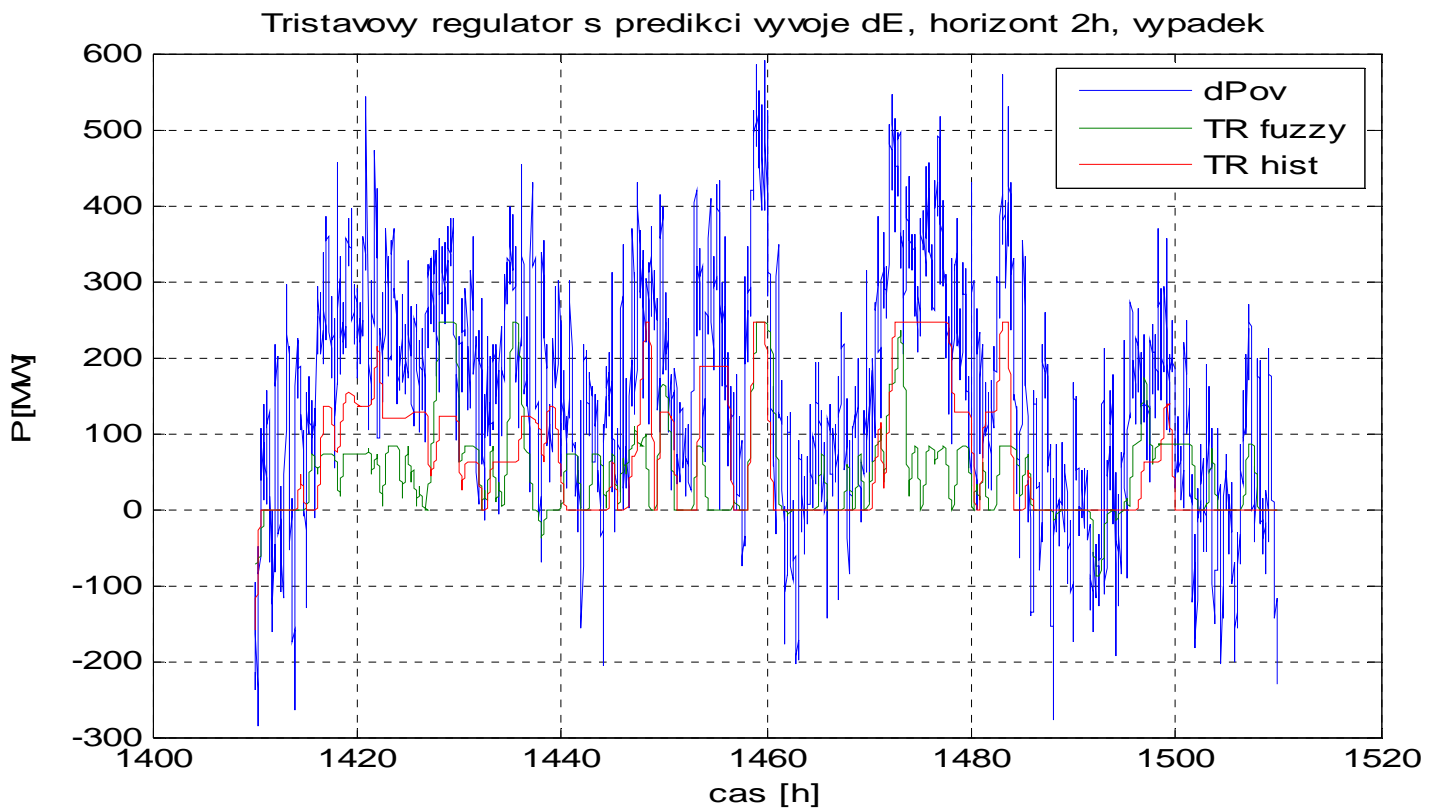
Při běžné nerovnováze je TR aktivována velmi často oproti předchozím modelům. Při výpadku je model značně nestabilní.



Obr. 7-31 Model s predikcí vývoje odchylky energie - běžná nerovnováha s aktivací TR



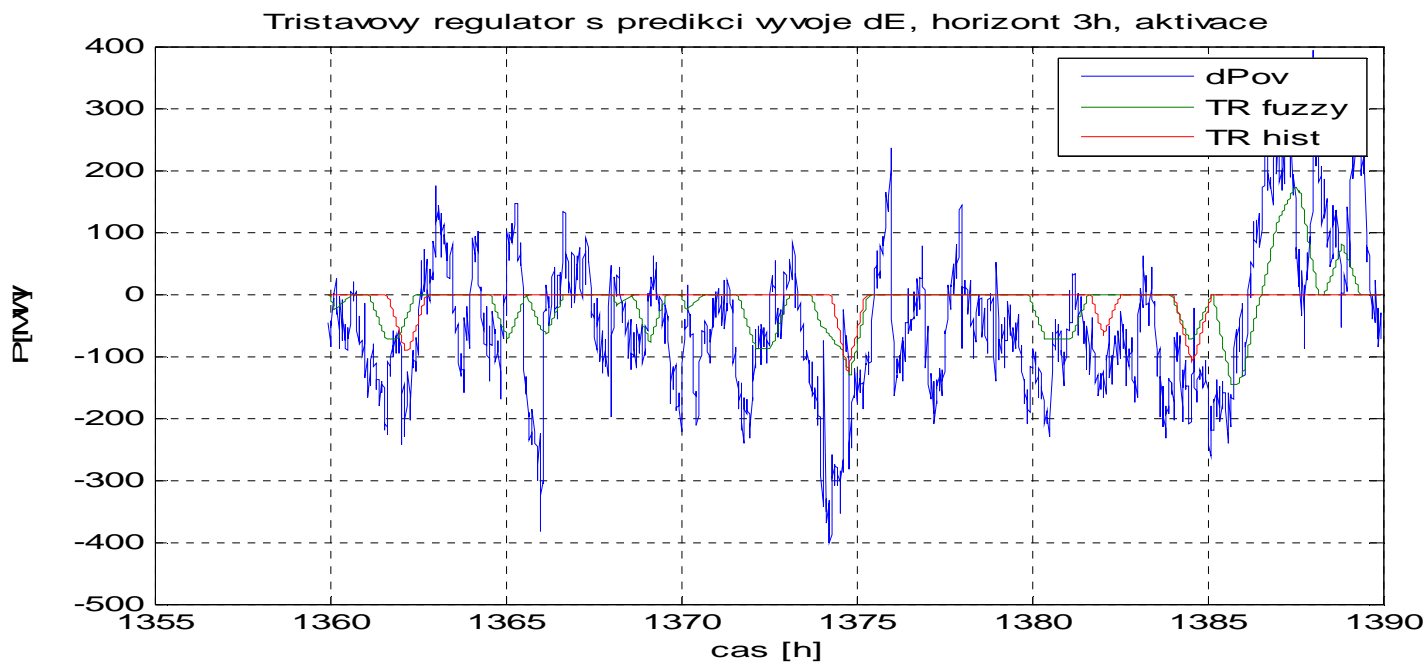
Obr. 7-32 Model s predikci vývoje odchyly energie - běžná nerovnováha bez aktivace TR



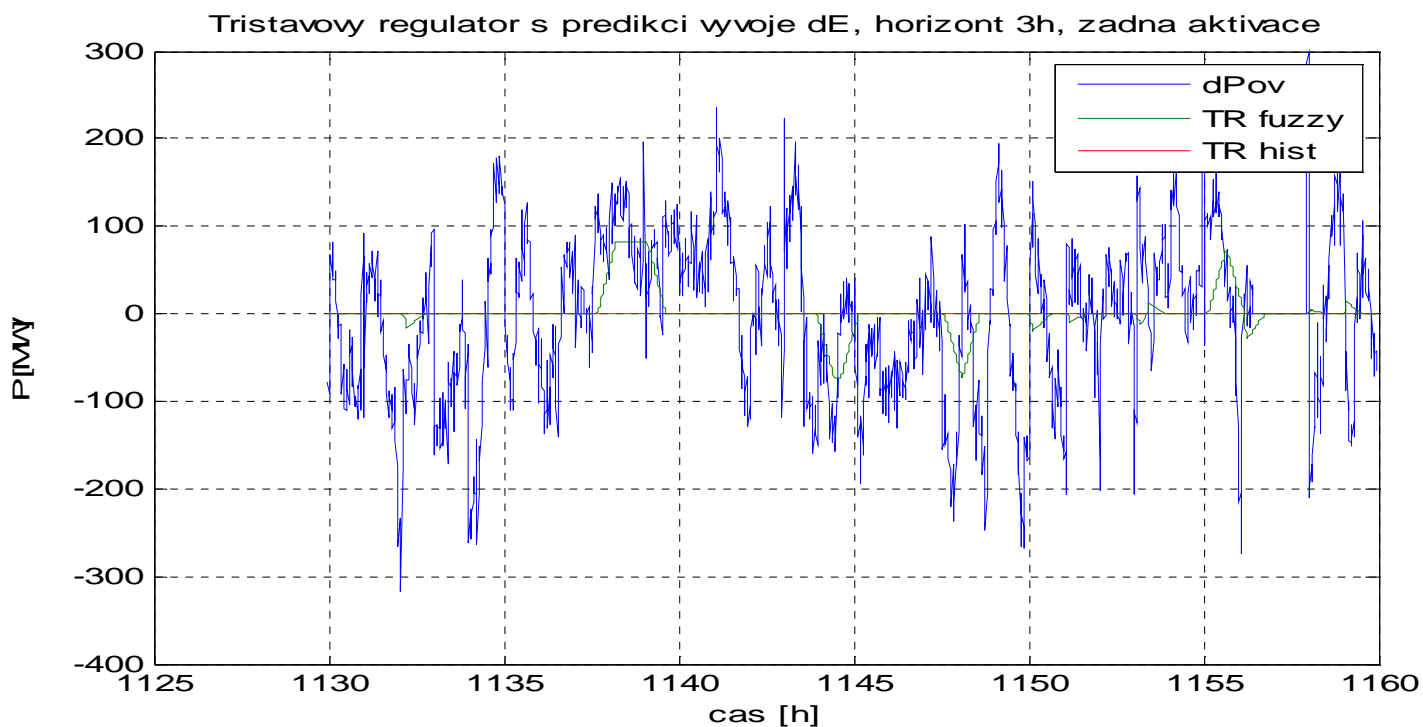
Obr. 7-33 Model s predikci vývoje odchyly energie - výpadek

### Tříhodinový horizont predikce

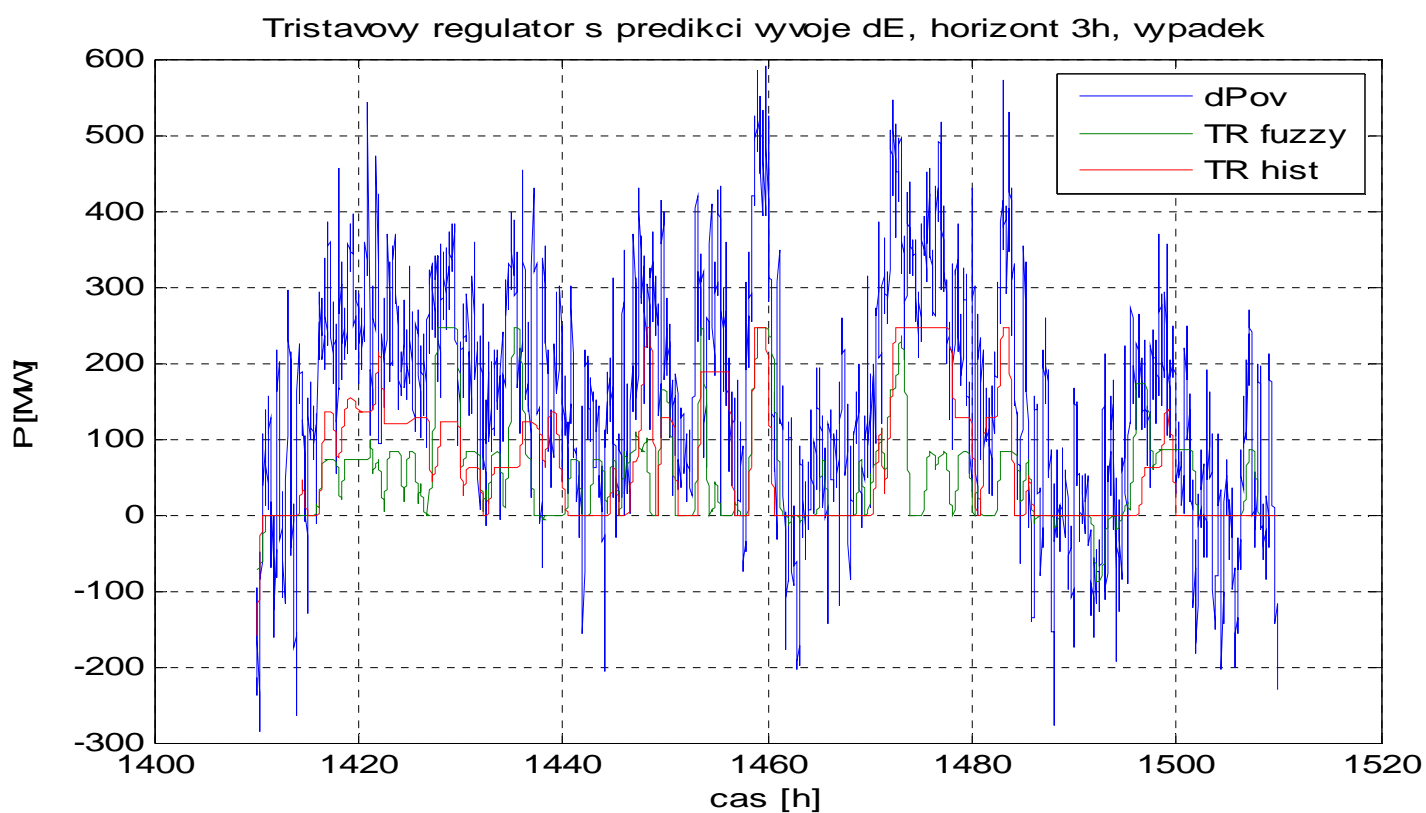
Chování modelu se nezměnilo oproti dvouhodinovému horizontu predikce. Nestabilita modelu přetrvává.



Obr. 7-34 Model s predikcí vývoje odchyly energie - běžná nerovnováha s aktivací TR



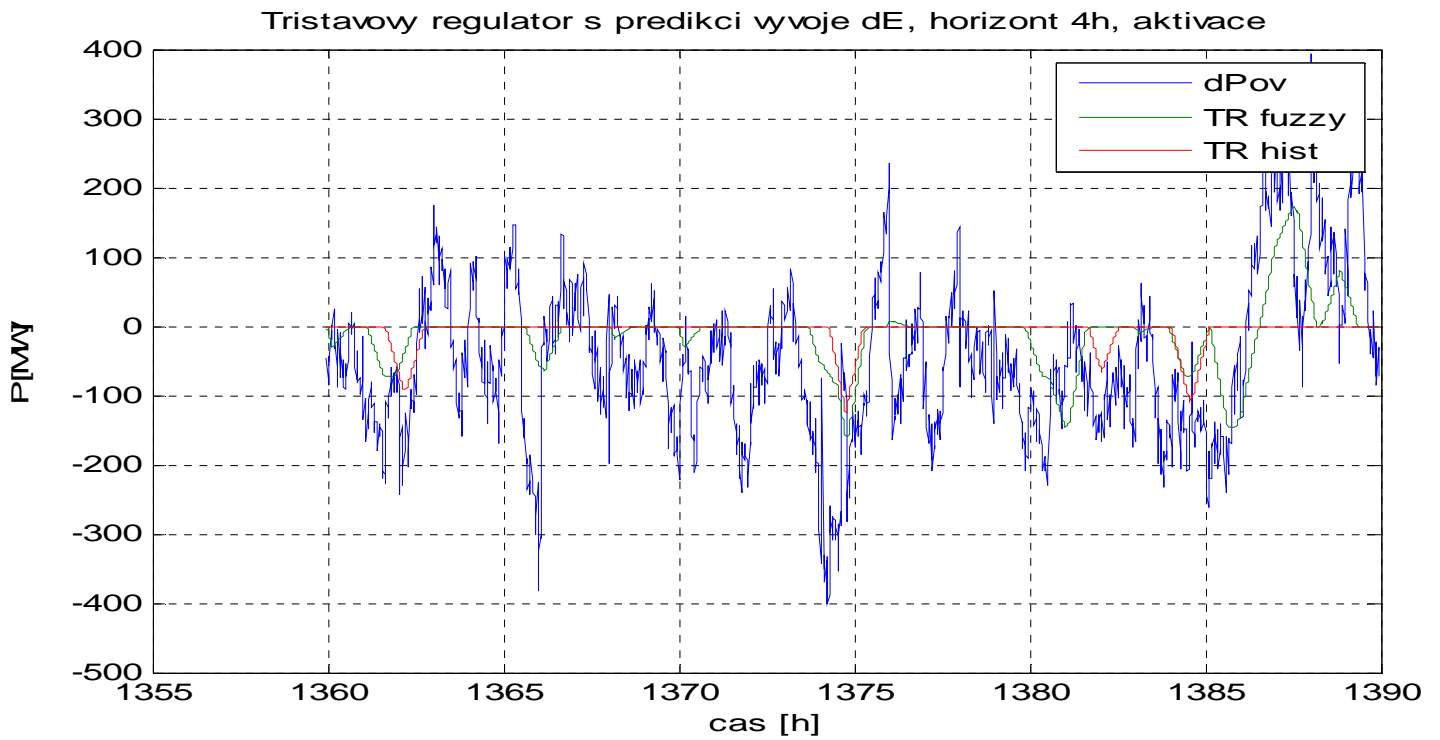
Obr. 7-35 Model s predikcí vývoje odchyšky energie - běžná nerovnováha bez aktivace TR



Obr. 7-36 Model s predikcí vývoje odchyšky energie - výpadek

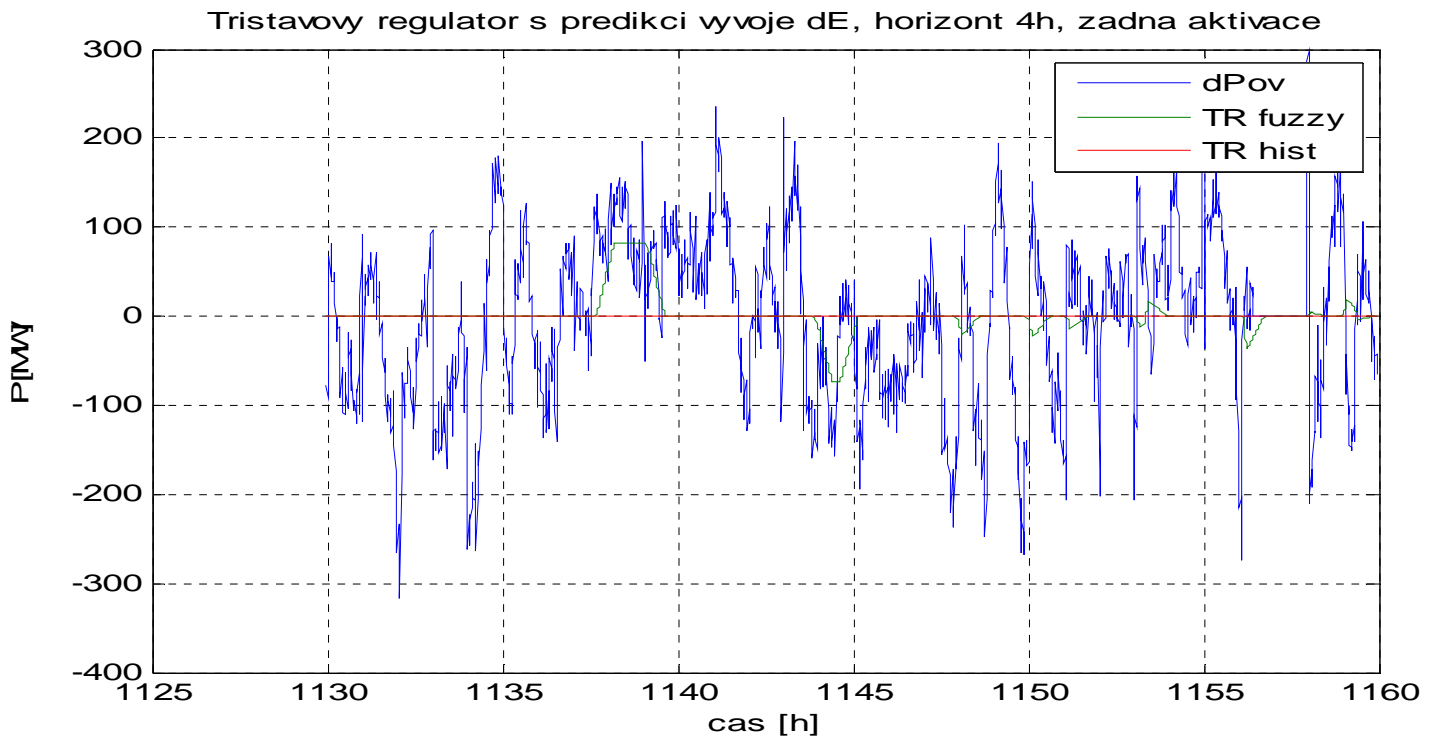
## Čtyřhodinový horizont predikce

Při běžné nerovnováze se zmenšil počet nesprávných aktivací TR, při výpadku je model stále nestabilní.

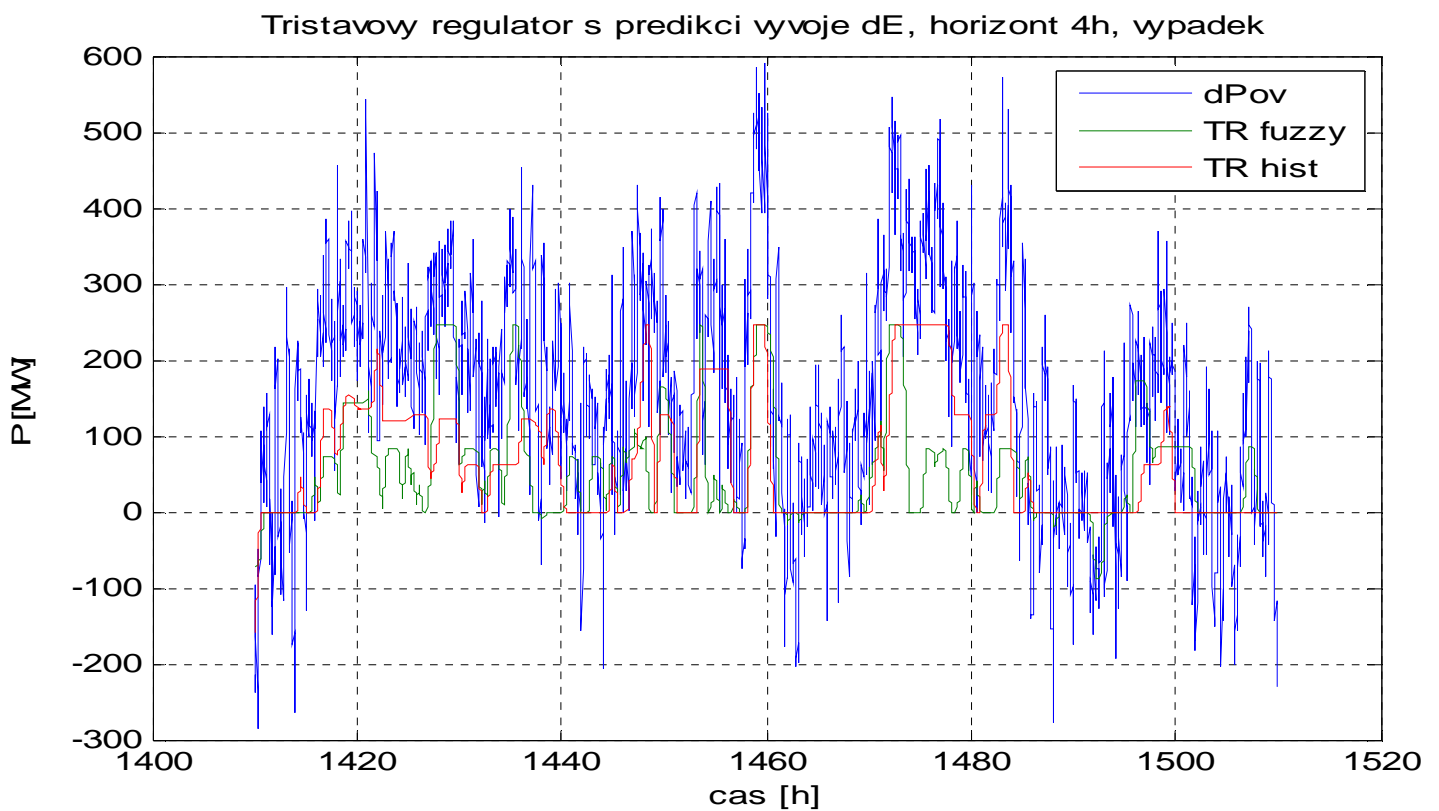


Obr. 7-37 Model s predikcí vývoje odchyly energie - běžná nerovnováha s aktivací TR





Obr. 7-38 Model s predikcí vývoje odchytky energie - běžná nerovnováha bez aktivace TR



Obr. 7-39 Model s predikcí vývoje odchytky energie – výpadek

## 8. Porovnání jednotlivých modelů

### 8.1. Způsoby porovnání

Pro porovnání jednotlivých modelů mezi sebou jsem použil tři metody. První metodou je spočítání efektivní hodnoty rozdílu historického průběhu a průběhu TR generovaného modelem podle vzorce 9.1. Tato metoda je často používána pro porovnávání průběhů různých signálů.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (TR_{hist} - TR_{reg})^2} \quad (9.1)$$

Druhá metoda pro srovnání modelů spočívá v zařazení každého úseku do jedné ze čtyř kategorií. Tyto kategorie jsou: správná aktivace, nesprávná aktivace, pouze model, pouze historie. Do kategorie pouze historie jsou započítány ty úseky, kdy byla aktivována TR pouze podle historických dat. Obdobně do kategorie pouze model jsou zařazeny úseky, kdy byla TR aktivována pouze modelem. Do kategorie správná aktivace jsou zařazeny ty úseky, kde se úseky, kdy je aktivovaná regulace podle historických dat, a úseky, kdy je regulace aktivovaná modelem, překrývají alespoň z 50%. Ostatní úseky jsou zařazeny do kategorie nesprávná aktivace. Poslední metoda porovnání spočívá ve srovnání průběhu TR aktivovanou modelem a skutečným průběhem získaným z historických dat.

Model, který bude podle těchto metod vyhodnocen jako nejlepší, pak porovná s původním modelem dispečera. Z tohoto srovnání pak bude patrné jestli navržený fuzzy model více odpovídá chování dispečera než model původní. Jako metody pro srovnání použiji metody zmíněné výše a pak také porovná objemy energií aktivované modely s objemem energie aktivované podle historických dat.

Jako období pro srovnání modelů jsem použil první čtvrtletí roku 2005. Rok 2005 byl použit proto, že během něho nedošlo k žádné mimořádné situaci jako je např. rozpad soustavy. Kvůli délce simulace byla použita pouze data z prvního čtvrtletí, což je dostatečně dlouhé období pro získání potřebných dat.

## 8.2. Porovnání

V tabulce 1 je uvedeno porovnání jednotlivých modelů podle metod zmíněných výše. Řádky odpovídají jednotlivým verzím modelu, ve sloupcích je počet aktivací v jednotlivých kategoriích.

	RMS	správná aktivace	nesprávná aktivace	pouze model	pouze historie
<b>1</b>	53.68	146	40	698	5
<b>2</b>	179.53	0	4	0	0
<b>3</b>	64.32	69	75	439	1
<b>4</b>	42.48	101	10	43	94
<b>5</b>	47.51	63	33	24	73
<b>6</b>	48.73	59	37	25	77
<b>7</b>	48.99	62	31	24	77
<b>8</b>	51.42	55	35	18	74
<b>9</b>	53.17	125	37	401	21
<b>10</b>	52.94	128	36	412	18
<b>11</b>	52.65	131	36	433	13
<b>12</b>	53.48	85	20	30	86

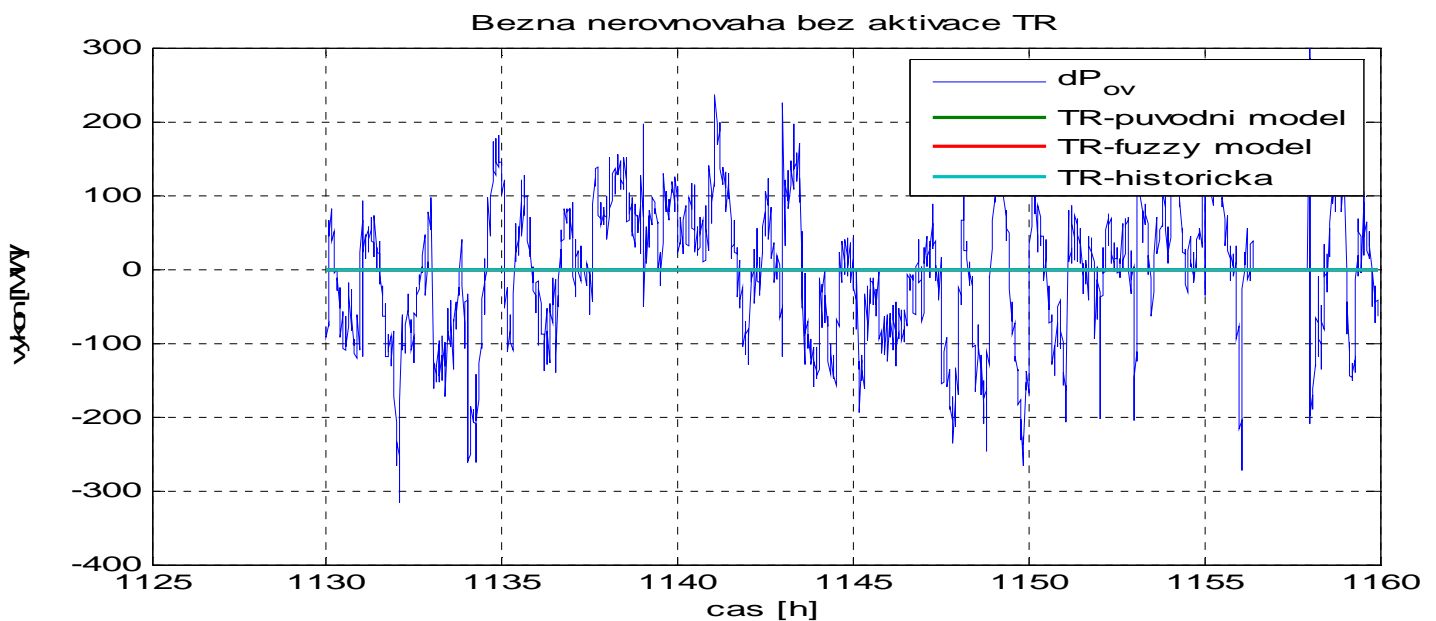
Tabulka 1 Srovnání jednotlivých modelů

<b>1</b>	Dvoustavový model
<b>2</b>	Třístavový model
<b>3</b>	Třístavový model s hysterezí
<b>4</b>	Třístavový model s hysterezí a predikcí výpadku
<b>5</b>	Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - horizont 1 hodina
<b>6</b>	Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - horizont 2 hodiny
<b>7</b>	Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - horizont 3 hodiny
<b>8</b>	Třístavový model s predikcí vývoje odchylky výkonu v otevřené smyčce - horizont 4 hodiny
<b>9</b>	Model s predikcí vývoje odchylky energie - horizont 2 hodiny
<b>10</b>	Model s predikcí vývoje odchylky energie - horizont 3 hodiny
<b>11</b>	Model s predikcí vývoje odchylky energie - horizont 4 hodiny
<b>12</b>	Původní model

Tabulka 2 Seznam modelů

Z tabulky 1 vyplývá, že v téměř všech sledovaných ukazatelích nejvíce odpovídá historickým datům třístavový model s predikcí výpadku. Při pohledu na obr. 7-16 je vidět, že při výpadku tento model více kmitá než modely, které používají predikci vývoje. Chování dispečera je však obdobné. Ze srovnání průběhů TR pomocí grafů uvedených u každé verze

regulátoru vyplývá, že tento model se ze všech srovnávaných modelů nejvíce přiblížil chování skutečného dispečera.



**Obr. 8-1 Srovnání s původním modelem**

Z obr. 8-1 až 8-3 je vidět, že ve sledovaných časových intervalech se fuzzy model a původní model chovají velmi podobně. Z porovnání podle prvních dvou metod, tedy hodnoty RMS odchylky a rozdělení aktivací do jednotlivých kategorií vychází o něco lépe fuzzy model s nižší hodnotou odchylky RMS, větším počtem správných a menším počtem nesprávných aktivací. Původní model pak fuzzy model předčí v menším počtu aktivací, kdy je TR aktivována pouze modelem, nebo naopak pouze v historii.

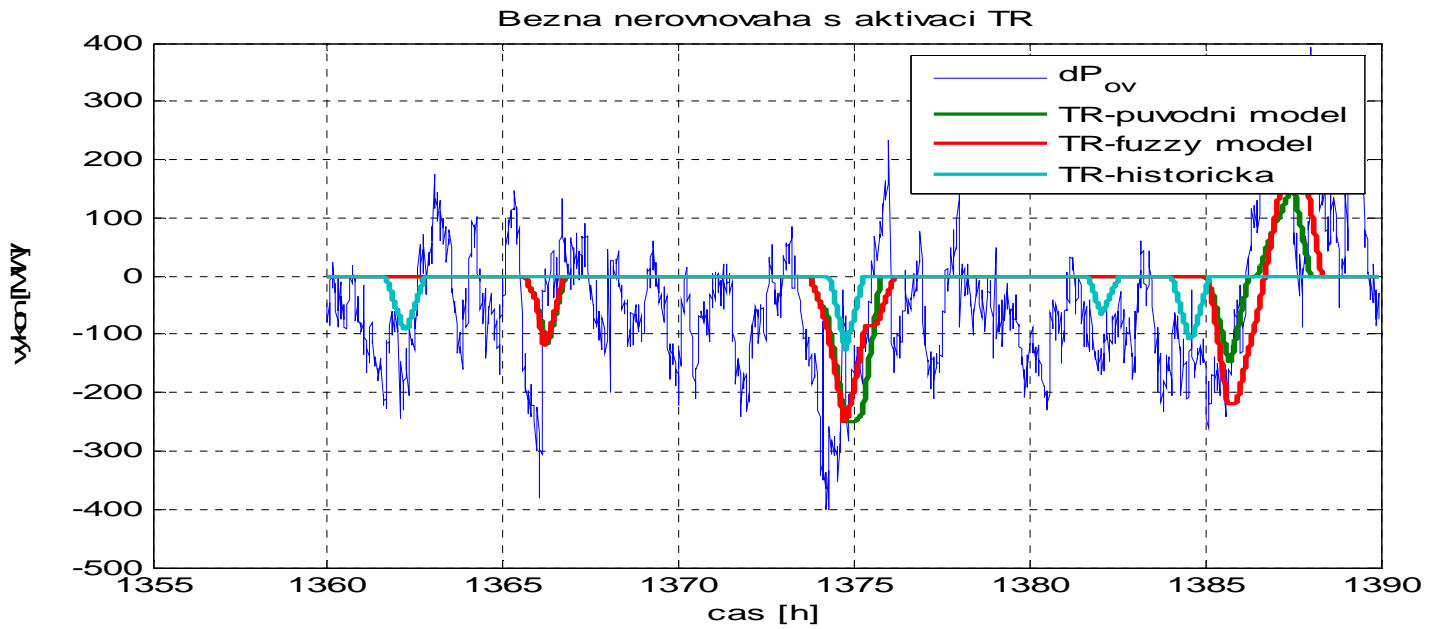
	Fuzzy model	Původní model	Skutečnost
Celkem aktivovaná energie	61 GWh	71 GWh	54 GWh
Energie aktivovaná pouze modelem	4,7 GWh	6,3 GWh	-
Energie aktivovaná modelem ve správných okamžicích	55 GWh	61 GWh	-

**Tabulka 3 Objemy energií aktivovaných modely**

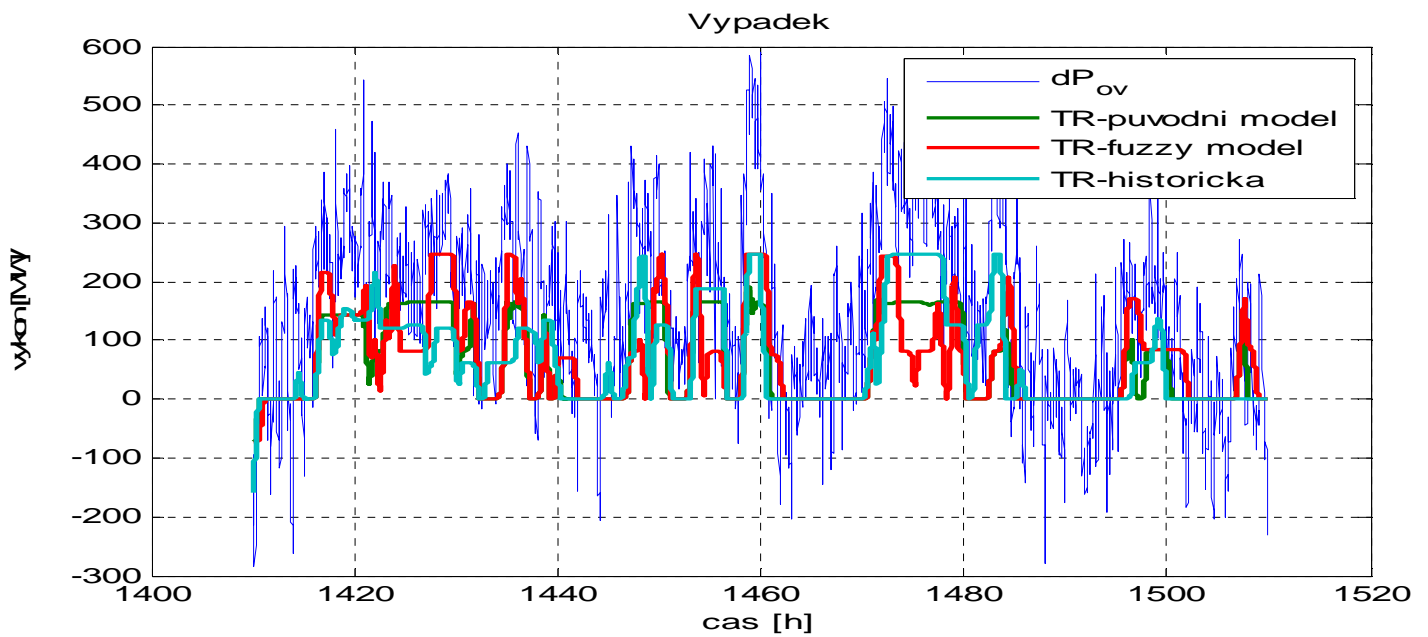
V tabulce 3 je uvedena aktivovaná energie oběma modely a ve skutečnosti, tato energie byla počítána podle vzorce 8.1 v intervalech popsanych v kapitole 8.1. Z této tabulky je

patrné, že fuzzy model je z hlediska aktivovaných objemů energie podobnější skutečnosti než model původní.

$$E = \sum abs(TR) \quad (8.1)$$



Obr. 8-2 Srovnání s původním modelem



Obr. 8-3 Srovnání s původním modelem

## 9. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit fuzzy model chování dispečera výkonové rovnováhy, který by více odpovídal skutečnému chování dispečera, než původní model.

V této práci bylo postupně navrženo šest modelů dispečera výkonové rovnováhy. Nejlepší z těchto modelů byl porovnán s původním modelem a z tohoto srovnání vyplynulo, že fuzzy model více odpovídá skutečnosti než původní model.

Nepodařilo se stanovit pravidla pro velikost aktivovaného výkonu. Tato pravidla zřejmě závisí na ceně TR, která se u jednotlivých výrobců liší. Tyto data však nebyly při navrhování modelu k dispozici. Tato pravidla však nejsou implementována ani v původním modelu dispečera.

## 10. Použitá literatura

- [1] H. Ying - Fuzzy Control and Modeling, IEEE Press, 2000
- [2] Martin Kod'ousek, - Podpůrné a systémové služby v elektrizační soustavě, ČVUT, 2005
- [3] Kodex Přenosové soustavy (revize 2005), ČEPS, a.s.
- [4] P. Horáček, E. Janeček a kol. Metodika a modely pro roční horizont plánování (revize 2), CAK,2005
- [5] P. Horáček, E. Janeček a kol. Norma spolehlivosti zajištění systémových služeb pro ES ČR, CAK,2005