

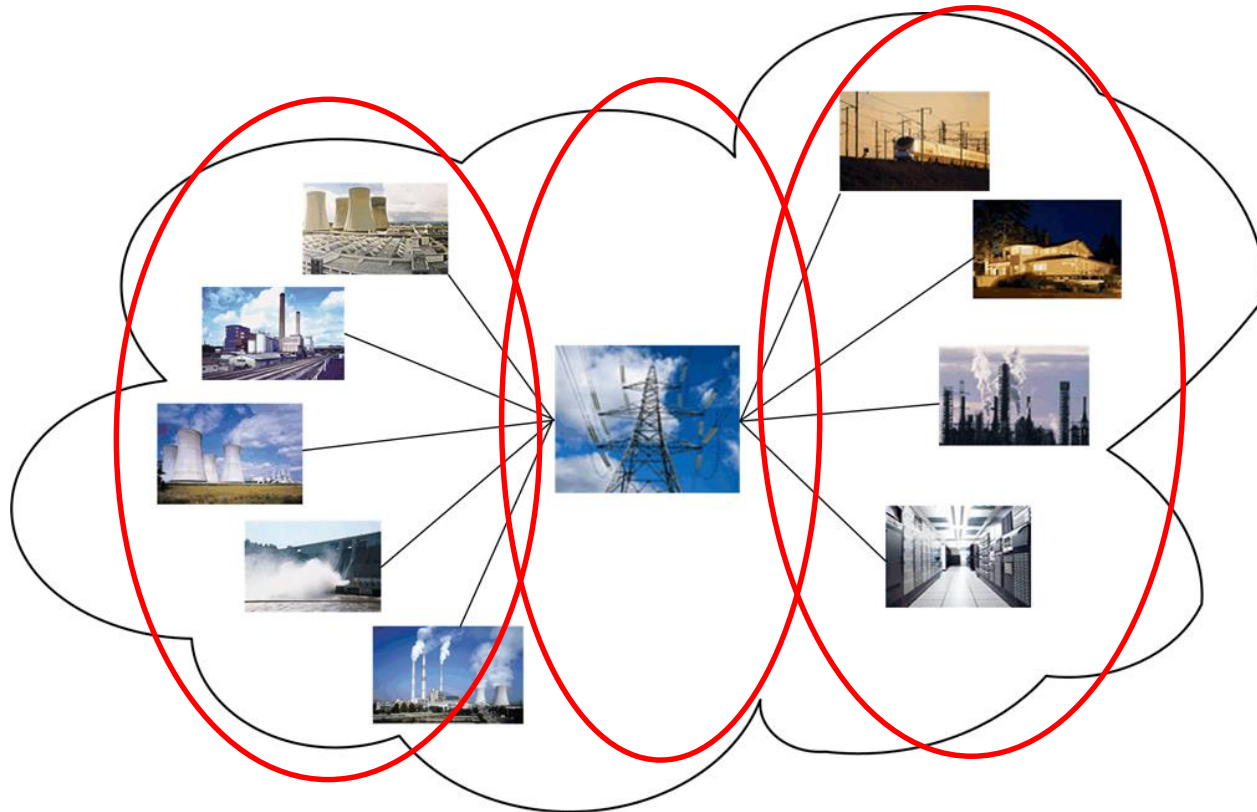
Základní pojmy a definice

Elektroenergetika

- vědní disciplína, jejímž předmětem zkoumání je zabezpečení elektrické energie pro lidstvo
 - Výroba elektrické energie
 - Přenos a distribuce elektrické energie
 - Spotřeba elektrické energie
 - Provoz elektrizační soustavy a dispečerské řízení
 - Zabezpečení a řízení rozvoje elektroenergetiky

Elektrizační soustava

- systém zajišťující výrobu, přenos, distribuci a konečné užití elektrické energie



Základní úkoly elektrizační soustavy

- Zajištění dostatečného množství elektrické energie v požadovaném čase
- Zajištění kvality elektrické energie
- Zajištění spolehlivosti dodávky elektrické energie
- Zajištění maximální ekonomie

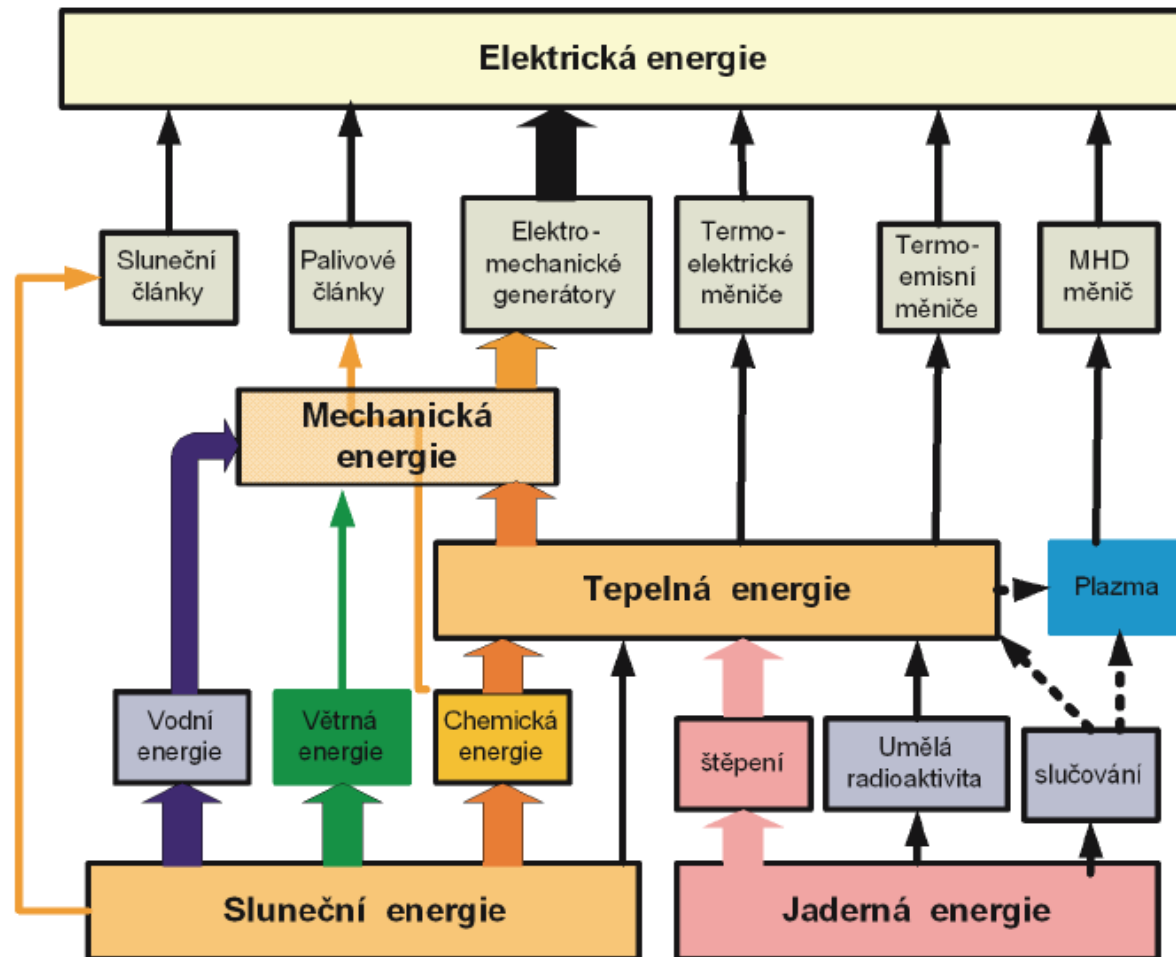
Elektrická energie

- Výhody
 - Snadná transformace na jiné druhy energie
 - Snadná transportovatelnost na velké vzdálenosti
 - Možnost generace ve velkých jednotkách
- Nevýhody
 - Nelze ji snadno akumulovat

Získávání elektrické energie

- Přeměnou energie primárních zdrojů na energii elektrickou
 - Energie Slunce
 - Energie Země
 - Energie interakce Země-Měsíc

Řetězce přeměn energií na energii elektrickou



Základní rozdělení zdrojů elektrické energie

- Podle způsobu získávání
 - Prvotní zdroje (získané těžbou)
 - Vyrobené zdroje (vzniklé zušlechtěním)
 - Druhotné zdroje (ze ztrát při přeměnách)
- Podle vyčerpatelnosti
 - Neobnovitelné
 - Dostupné v omezeném množství
 - Obnovitelné zdroje
 - Schopnost částečné nebo úplné obnovy a to samy nebo za přispění člověka

Základní rozdělení zdrojů elektrické energie

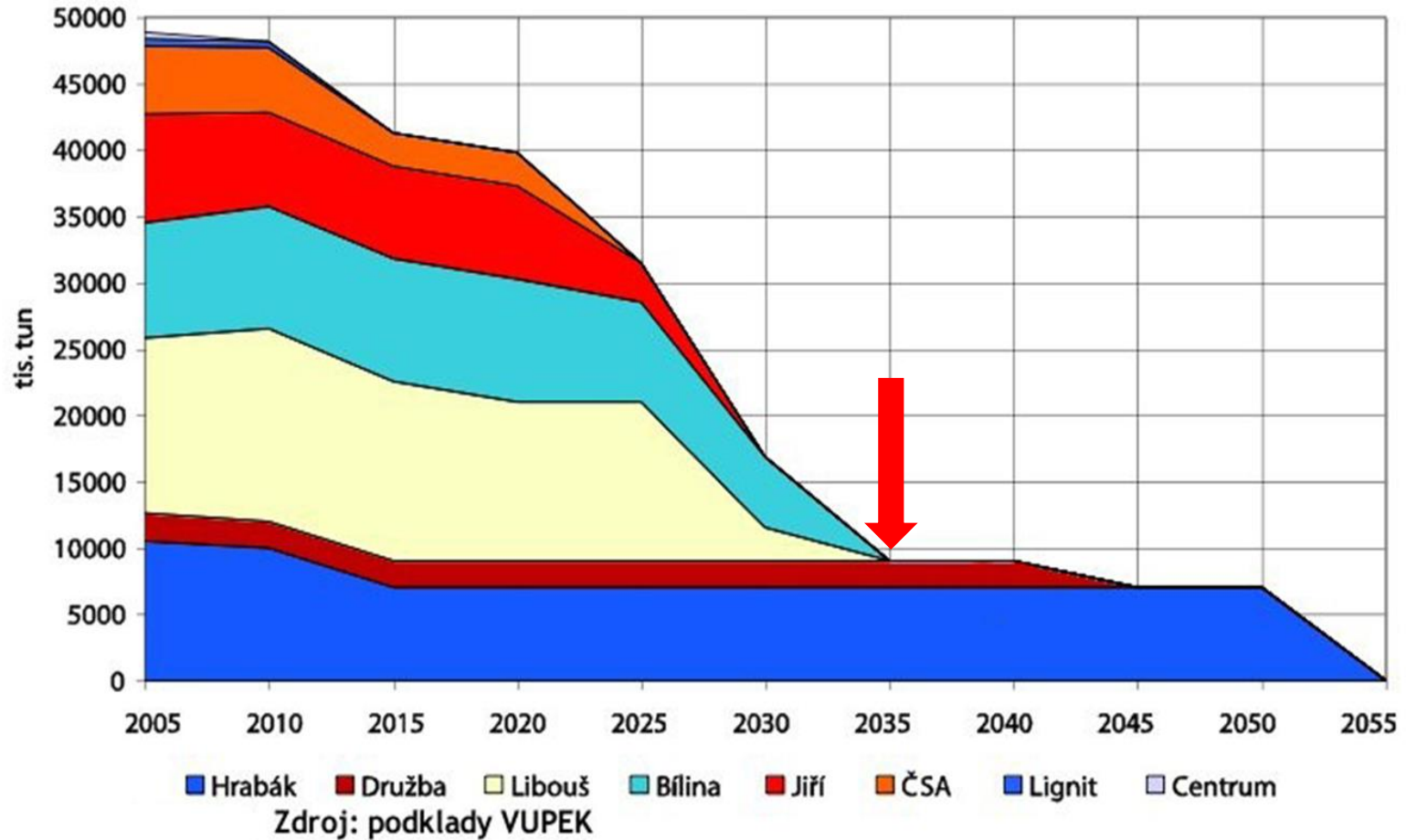
- Neobnovitelné
 - fosilní paliva
 - jaderná paliva



- Obnovitelné
 - energie vody
 - energie větru
 - sluneční záření
 - bioplyn, biomasa
 - geotermální energie
 - energie mořských vln, přílivu a odlivu, ...



Zásoby uhlí v ČR



Struktura instalovaného výkonu ČR

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
PE	69,9	70,5	70,2	65,3	61,4	61,4	61,2	61,1	60,6	60,3	58,5	53,7
PPE + PSE	4,4	4,3	4,5	4,7	4,5	4,5	4,6	4,6	4,6	5,1	5,1	5,1
VE	14,1	13,7	13,9	13,1	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,3	11,9	11,0
JE	11,6	11,5	11,4	16,9	21,7	21,6	21,6	21,5	21,4	21,2	20,9	19,4
VTE + FVE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4	1,0	1,1	3,6	10,8
Suma ČR	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
z toho CEZ	66,7	66,2	65,7	68,3	70,1	69,7	69,8	69,4	69,2	69,0	67,1	61,6
Instalovaný výkon [MW _e]	15 216,4	15 323,8	15 443,4	16 310,5	17 344,0	17 434,1	17 412,2	17 507,6	17 561,0	17 724,2	18 325,7	20 072,90

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Celkem ČR	17 412,0	17 507,1	17 561,0	17 724,2	18 325,8	20 072,9	20 250,0	20 519,5	21 079,2	21 920,3
Jaderné (JE)	3 760,0	3 760,0	3 760,0	3 760,0	3 830,0	3 900,0	3 970,0	4 040,0	4 290,0	4 290,0
Parní (PE)	10 664,0	10 690,7	10 648,1	10 685,2	10 720,1	10 769,0	10 787,5	10 644,1	10 819,5	10 836,7
Paroplynové (PPE)				569,7	560,7	590,7	590,7	520,7	518,0	1 363,0
Plynové a spalovací (PSE)	800,0	837,7	860,9	327,9	374,2	433,7	510,8	750,1	820,1	833,3
Vodní (VE)	1 019,5	1 028,5	1 029,0	1 045,3	1 036,5	1 056,1	1 054,6	1 069,2	1 082,7	1 080,4
Přečerpávací (PVE)	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 146,5	1 171,5
Větrné (VTE)	21,9	43,5	113,1	150,0	193,2	217,8	218,9	263,0	270,0	278,1
Fotovoltaické (FVE)	0,1	0,2	3,4	39,5	464,6	1 959,1	1 971,0	2 086,0	2 132,4	2 067,4

zdroj dat: předchozí roční zprávy, výkaz ERÚ-1, OTE, a.s.

Tepelné elektrárny nad 100 MW

Lokalita	Počet bloků	Intalovaný výkon[MW]	Úroveň napětí [kV]	Rok spuštění
Hodonín	2	105	110	1957
Chvaletice	4	800	400	1977-78
Dětmarovice	4	800	400	1975-76
Ledvice 2	2	220	110	1967
Ledvice 3	1	110	110	1967
Mělník II	2	440	110	1971
Mělník III	1	500	400	1981
Počerady	5	1000	400	1970-77
Prunéřov I	4	440	110/400	1967-68
Prunéřov II	5	1050	400	1981-82
Tisová I	4	183	110	1959-60
Tisová II	1	112	220	1961
Tušimice II	4	800	400	1974-75

Jaderné elektrárny

Lokalita	Počet bloků	Intalovaný výkon [MW]	Úroveň napětí [kV]	Rok spuštění
JE Dukovany	4	1760	400	1985-88
JE Temelín	2	2000	400	2002

Vodní elektrárny

Lokalita	Počet bloků	Intalovaný výkon [MW]	Úroveň napětí [kV]	Rok spuštění
Dalešice	4	450	400	1978
Dlouhé Stráně	2	650	400	1996
Kamýk	4	40	110	1961
Lipno I	2	120	110	1959
Orlík	4	364	220	1961-62
Slapy	3	144	110	1955-56
Štěchovice I	2	22	110	1943-44
Štěchovice II	3	45	110	1996
Vrané nad Vltavou	2	13,88	110	1936

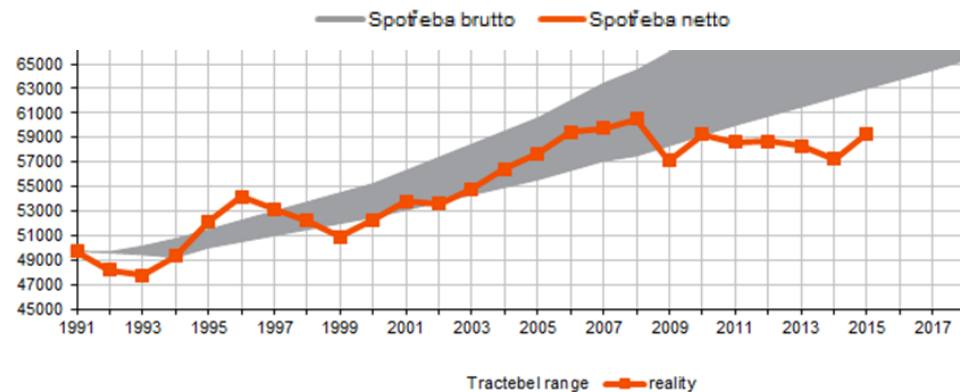
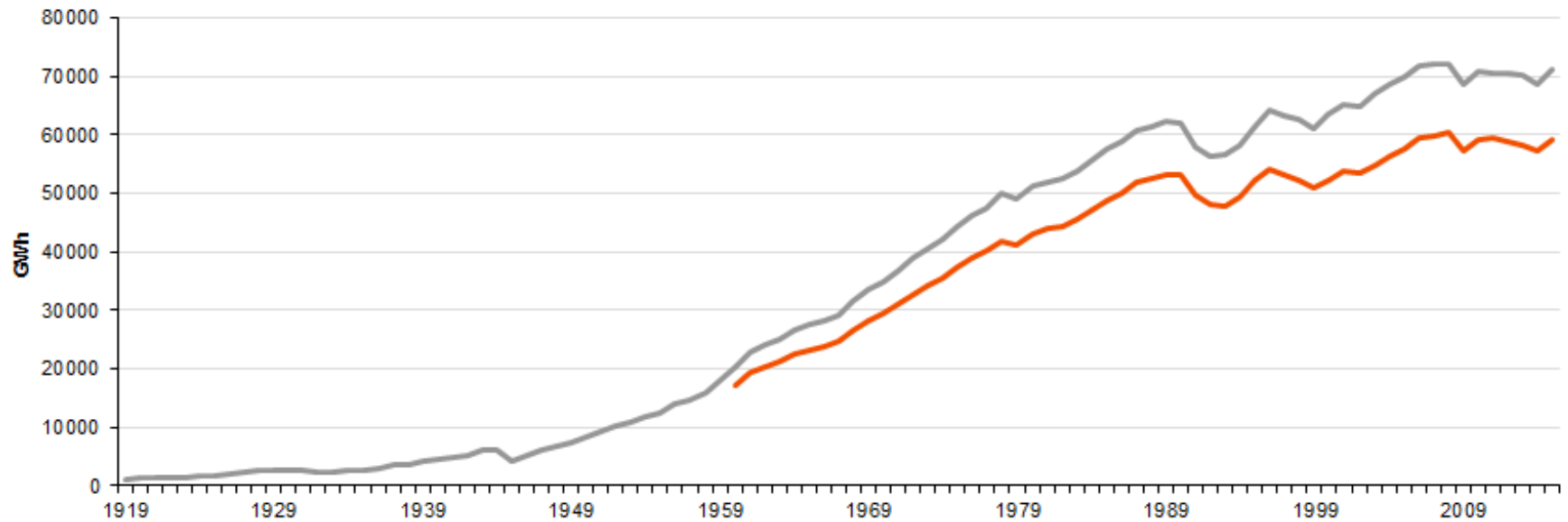
Jaderné elektrárny

Lokalita	Počet bloků	Intalovaný výkon [MW]	Úroveň napětí [kV]	Rok spuštění
JE Dukovany	4	1760	400	1985-88
JE Temelín	2	2000	400	2002

Vodní elektrárny

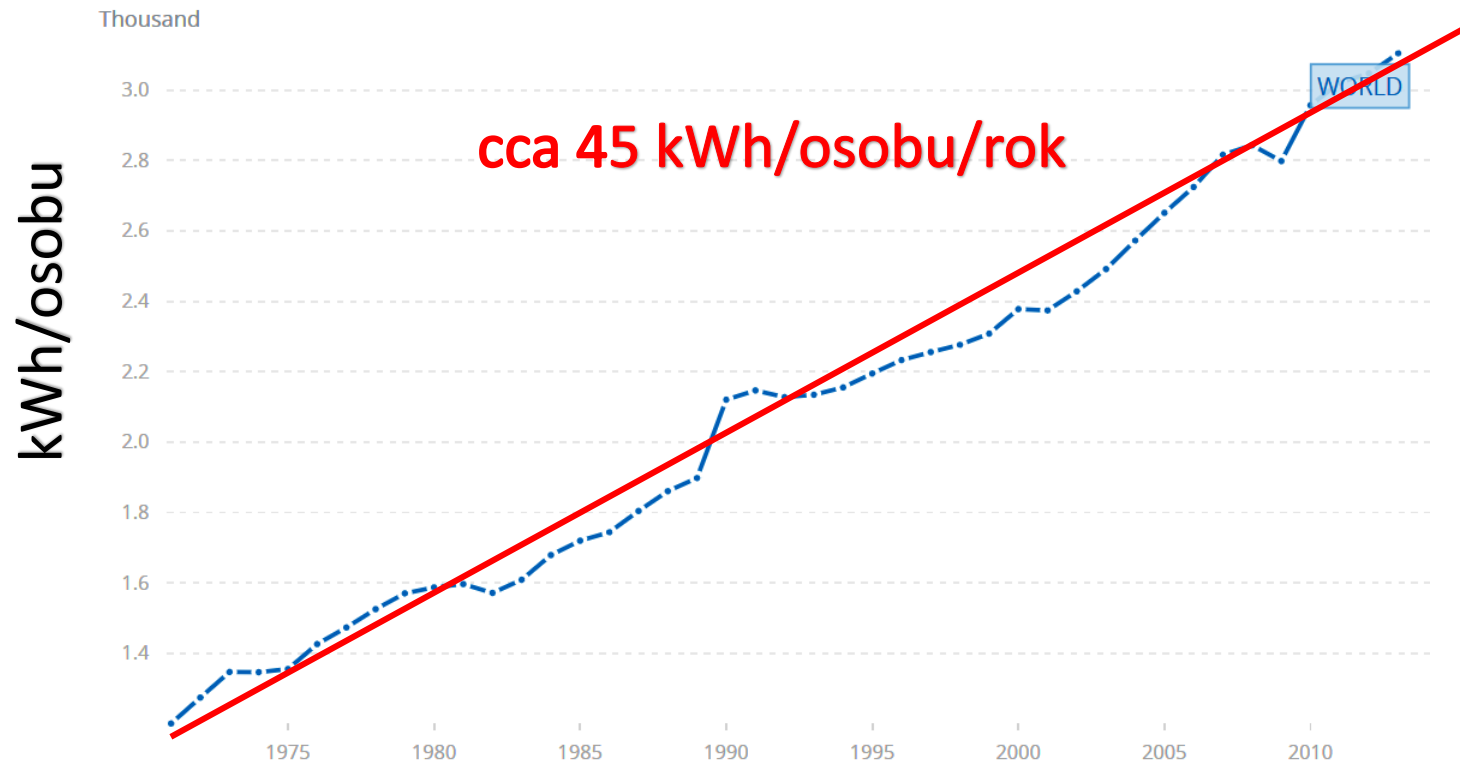
Lokalita	Počet bloků	Intalovaný výkon [MW]	Úroveň napětí [kV]	Rok spuštění
Dalešice	4	450	400	1978
Dlouhé Stráně	2	650	400	1996
Kamýk	4	40	110	1961
Lipno I	2	120	110	1959
Orlík	4	364	220	1961-62
Slapy	3	144	110	1955-56
Štěchovice I	2	22	110	1943-44
Štěchovice II	3	45	110	1996
Vrané nad Vltavou	2	13,88	110	1936

Dlouhodobý vývoj spotřeby elektrické energie ČR



ERU 2016

Dlouhodobý vývoj spotřeby elektrické energie - svět



World bank 2016

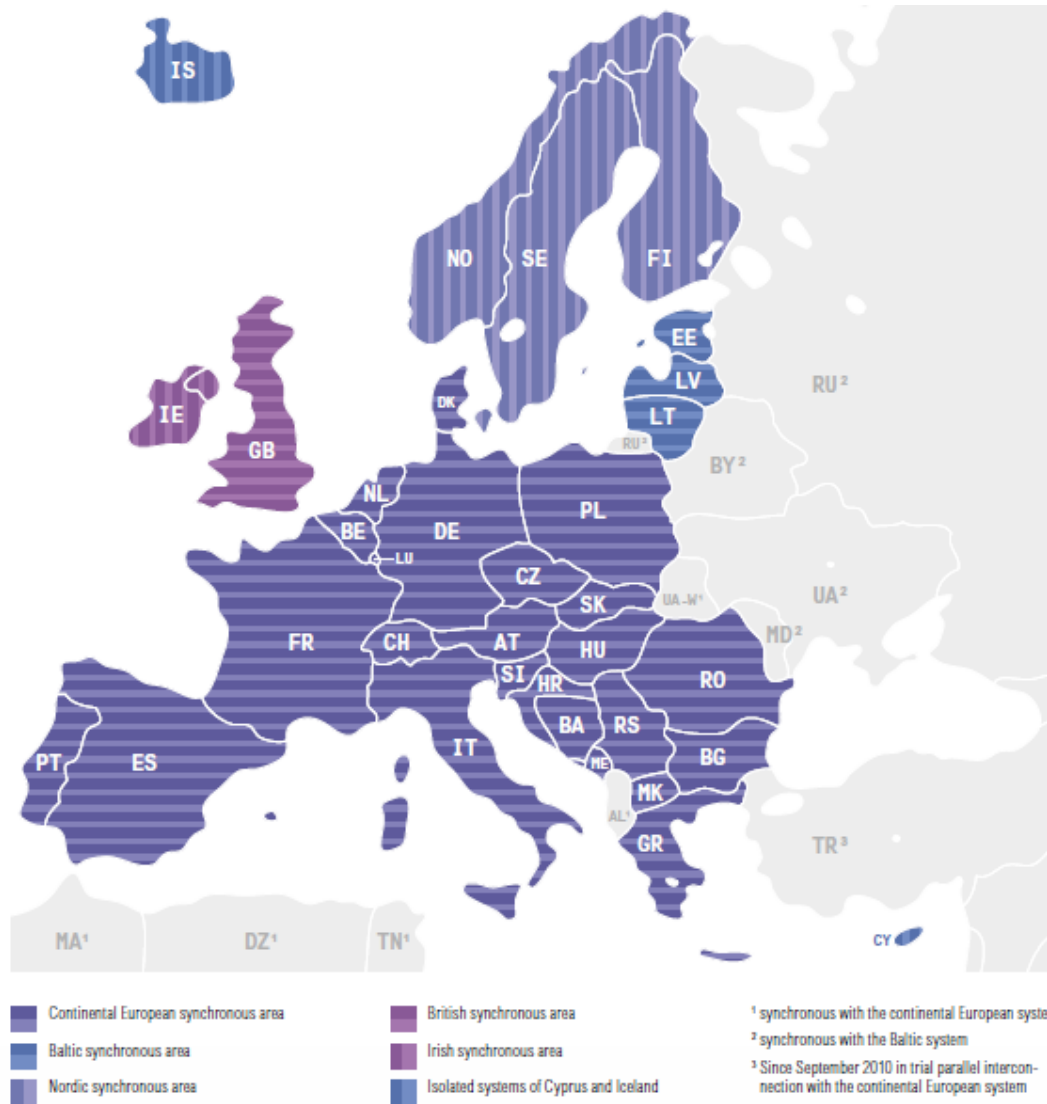
Definice výkonů zařízení

- **Jmenovitý výkon P_N** největší trvalý výkon zařízení, pro který jsou vypočítány a postaveny
- **Instalovaný výkon P_i** součet jmenovitých činných výkonů všech stejných zařízení nacházejících se v jednom objektu
- **Dosažitelný výkon P_d** maximální výkon, kterého může zařízení dosáhnout při správném stavu a při normálních provozních podmínkách
- **Pohotový výkon P_p** největší dosažitelný výkon, který zařízení dosáhne v určité době s ohledem na všechny technické a provozní podmínky
- **Technické minimum výkonu P_{TM}** nejmenší trvalý výkon s nímž může elektrárna nebo spotřebitel pracovat bez nebezpečí poškození zařízení

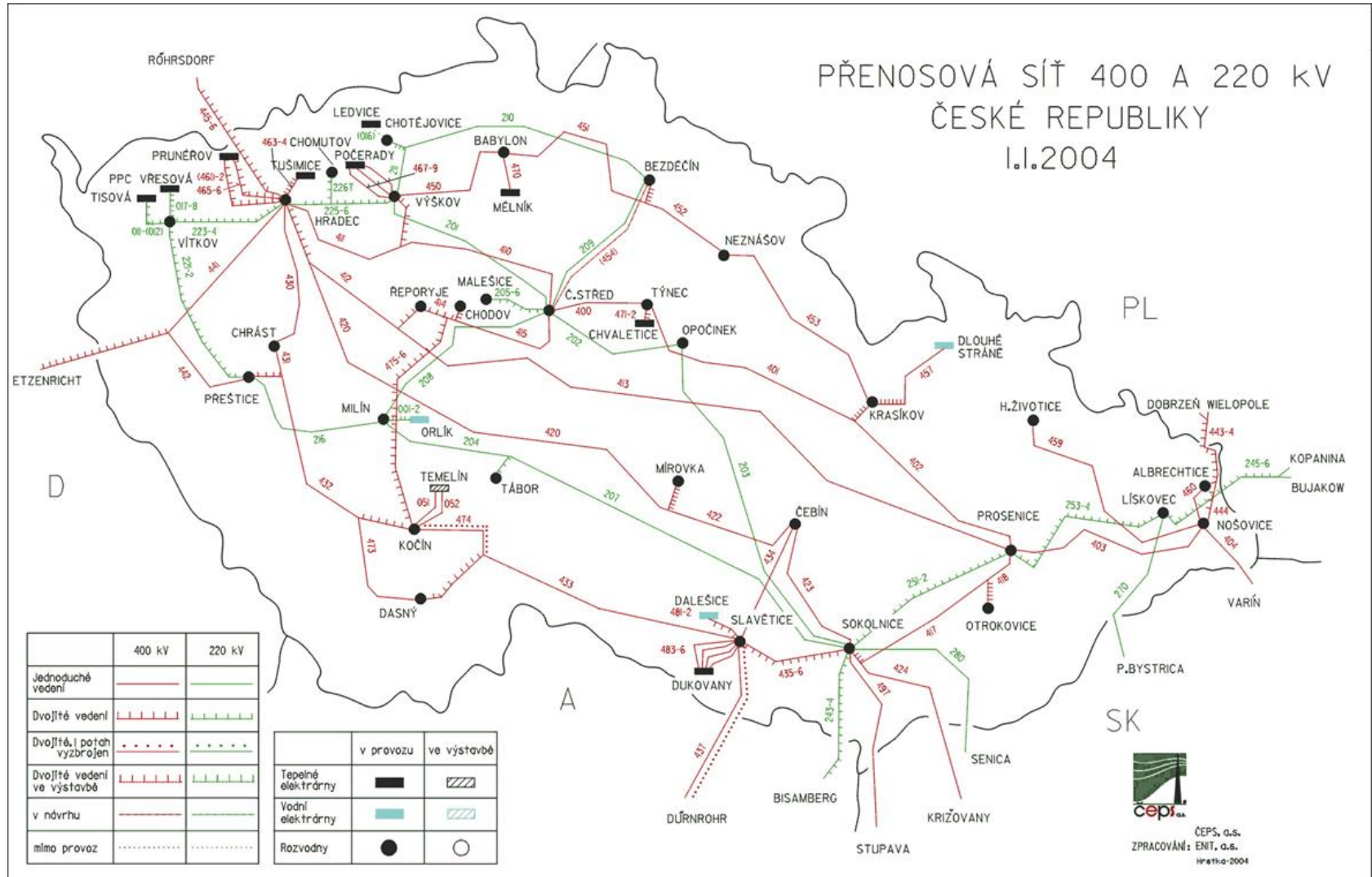
Přenosová soustava

- Propojený soubor vedení a zařízení sloužící k zajištění přenosu elektrické energie z výrobních jednotek do distribučních soustav
- Vedení, transformátory a rozvodny na hladině napětí 400 kV, 220 kV (+ dvě rozvodny a 105 km vedení 110 kV)
- Provozovatelem přenosové soustavy v ČR je akciová společnost ČEPS.
- Naše přenosová soustava je propojena do evropského přenosového systému (ENTSO-E) přeshraničními vedeními

Přenosové soustavy v Evropě



Přenosová soustava ČR



Přeshraniční toky

Přeshraniční fyzikální toky (GWh)

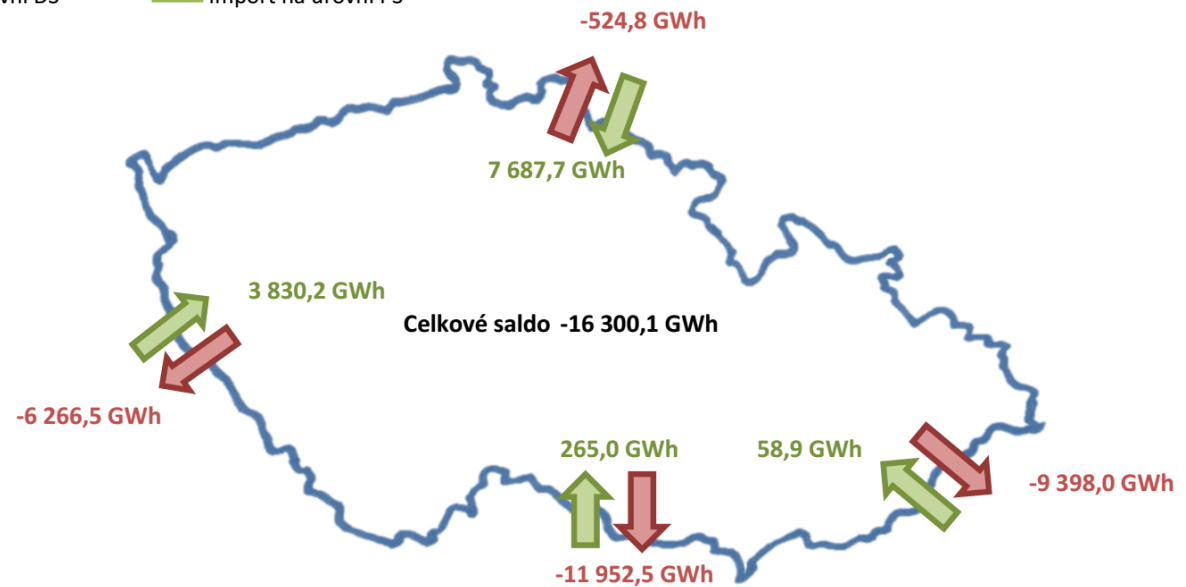
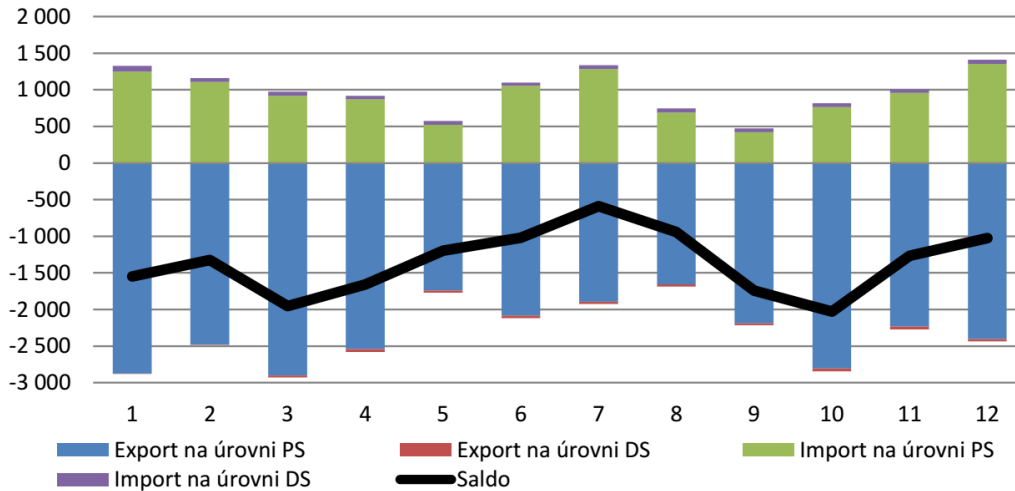
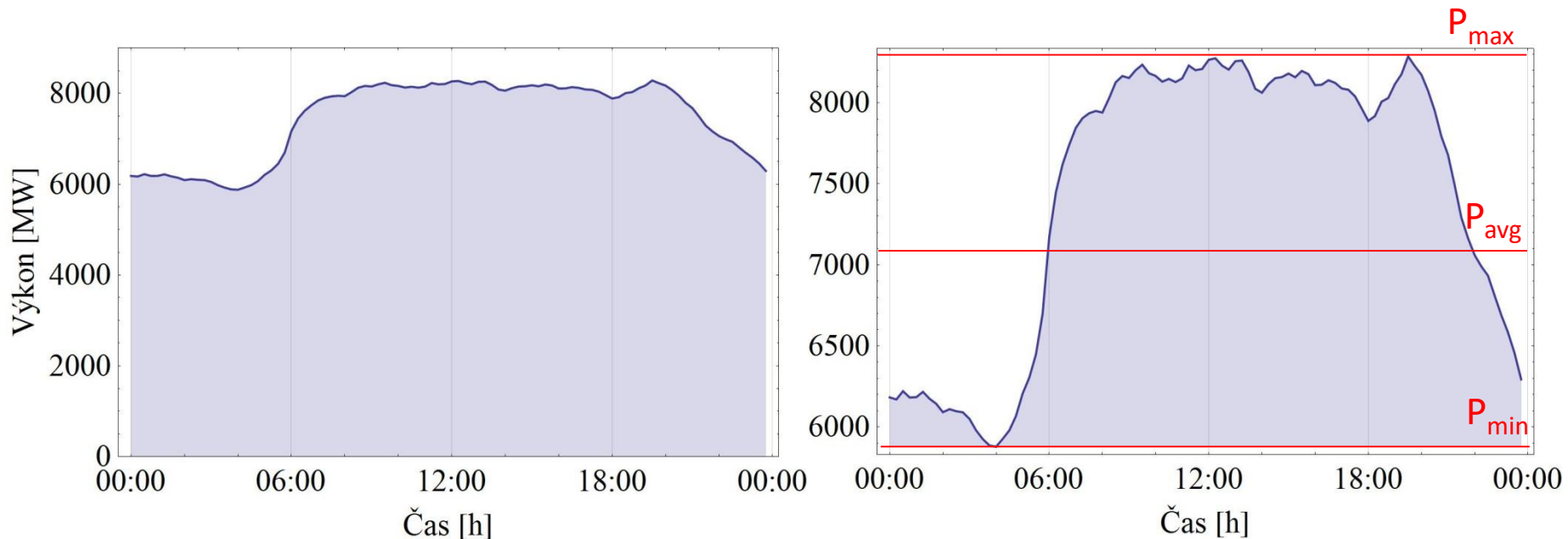


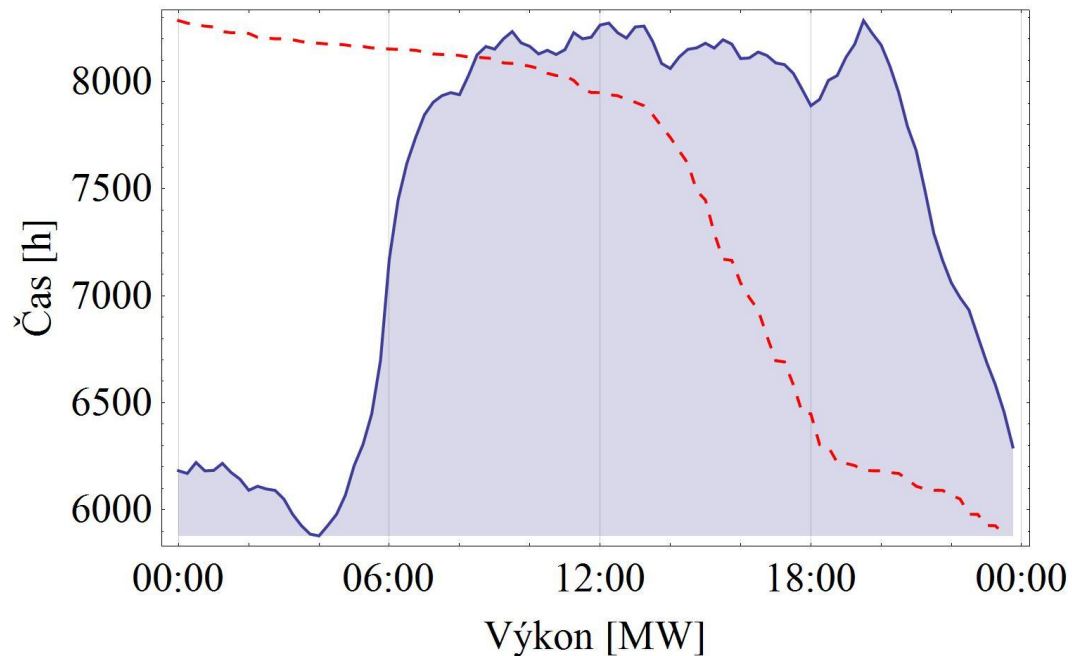
Diagram zatížení

- Závislost výkonu P (MW) na čase t (h) vztažená na soustavu jako celek, elektrárnu nebo výrobní závod



Čára trvání výkonů

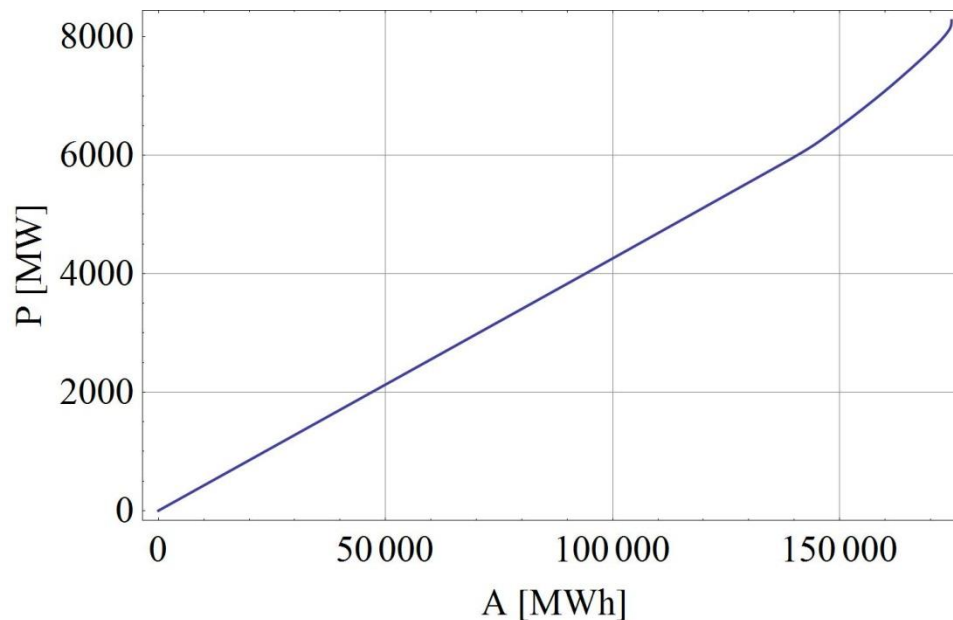
- Čáru trvání výkonů dostaneme seřazením zatížení od největšího k nejmenšímu podle doby trvání



Výrobní křivka

- Výrobní křivka je kumulativním integrálem čáry trvání výkonů podle výkonu

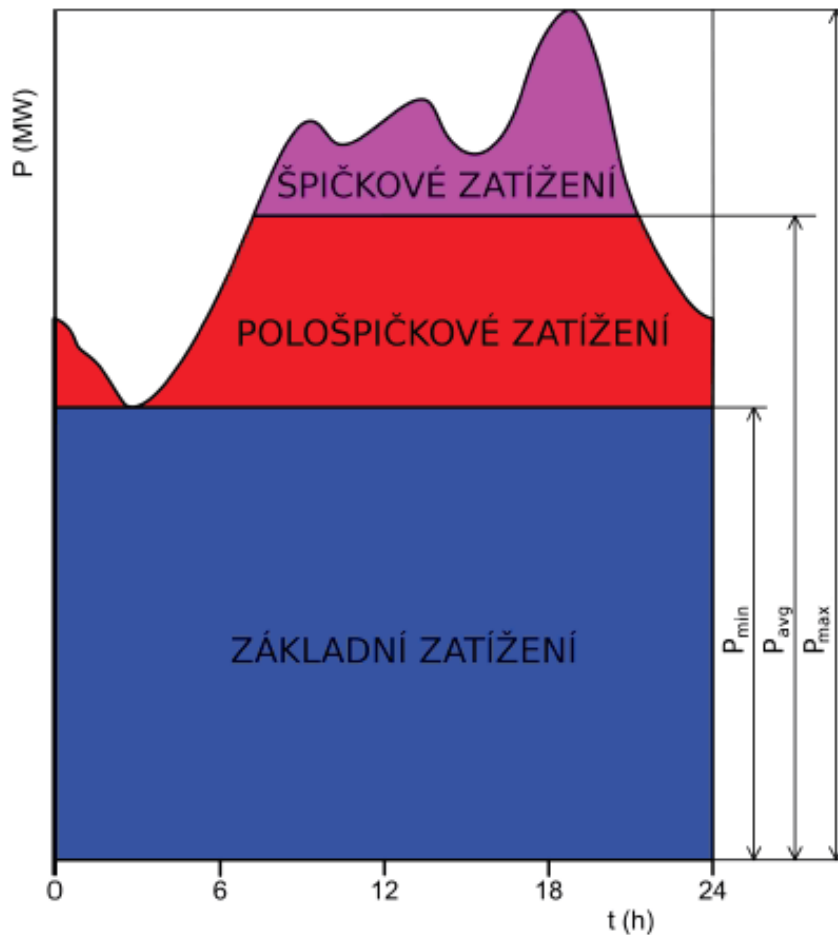
$$A_c = \int_0^{P_{max}} t(P) dP$$



Rozdělení denního diagramu podle zatížení

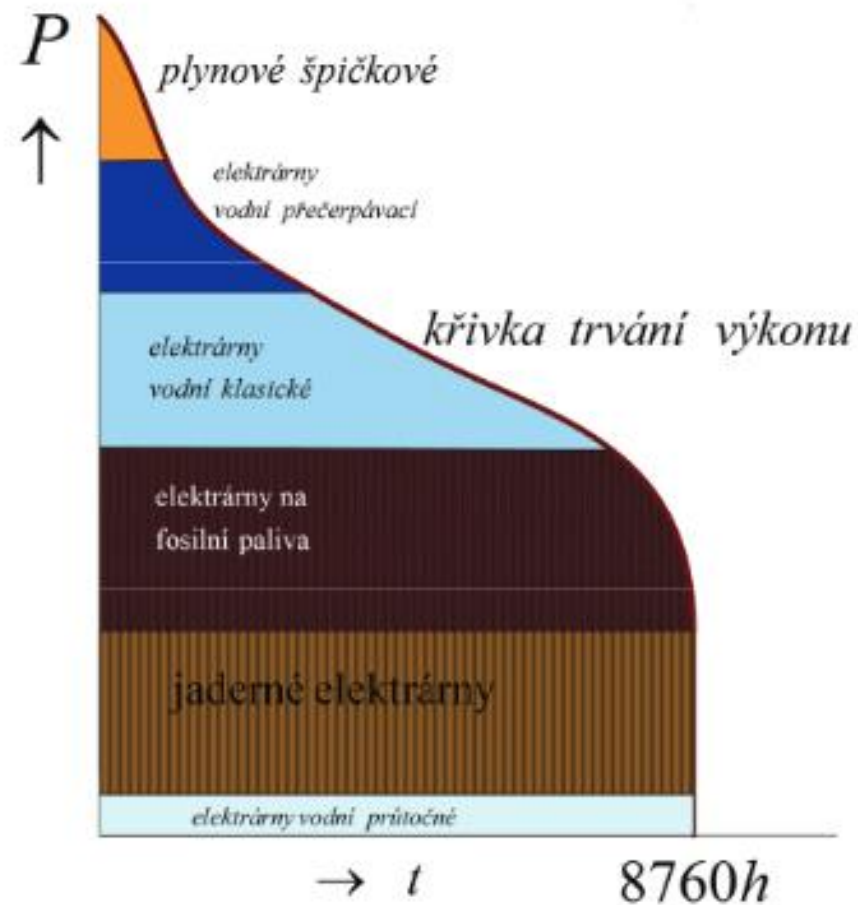
- **Základní zatížení** část diagramu zatížení ležící pod minimálním zatížením
- **Pološpičkové zatížení** část zatížení mezi středním a základním zatížením
- **Špičkové zatížení** část zatížení nad středním zatížením
- **Střední zatížení** P_{avg} trvalé zatížení při němž by zařízení dosáhlo za celé sledované období stejné práce W jako podle diagramu zatížení

Pokrývání denního diagramu zatížení



- Přečerpávací vodní elektrárny
- Akumulační vodní elektrárny
- Akumulační vodní elektrárny
- PPC a plynové elektrárny
- Uhlé a jaderné elektrárny
- Průtočné vodní elektrárny

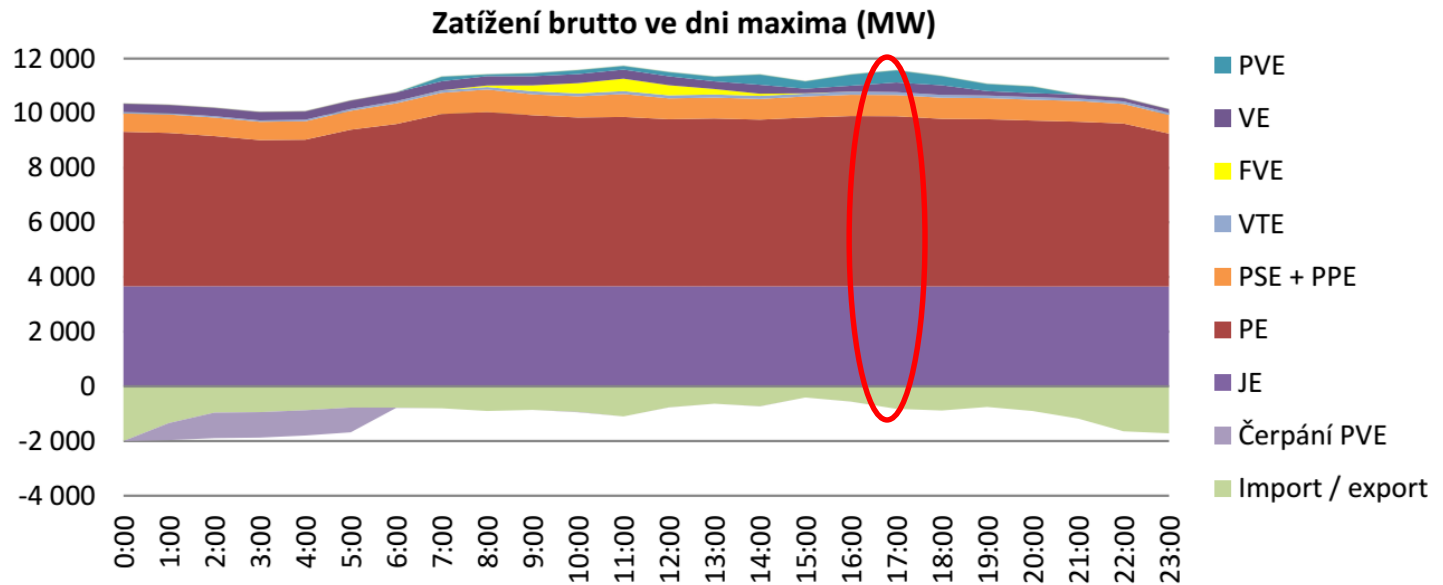
Řazení elektráren do křivky trvání výkonů



Pokrytí dne maxima zatížení (ERU 2014)

Struktura pokrytí denního maxima zatížení	[MW]	[%]
Spotřeba brutto bez čerpání PVE [MWh]	10 860,8	100%
Jaderné elektrárny (JE)	3 660,6	34%
Parní elektrárny (PE)	6 234,7	57%
Paroplynové, plynové el (PPE+PSE)	777,3	7%
Vodní elektrárny (VE)	212,8	2%
Přečerpávací vodní el. (PVE)	415,1	4%
Fotovoltaické el. (FVE)	2,7	0%
Větrné el. (VTE)	116,9	1%
Ostatní	0,0	0%
Saldo	-557,5	-5%
Čerpání PVE	-1,8	0%

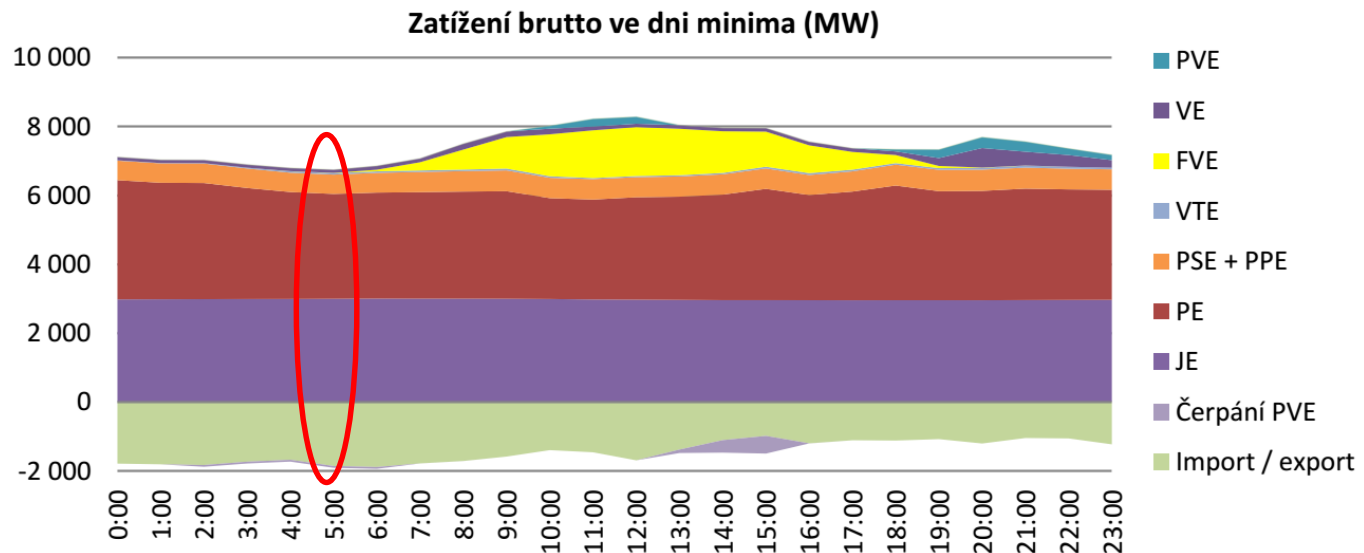
zdroj dat: výkaz ERÚ-3



Pokrytí dne minima zatížení (ERU 2014)

Struktura pokrytí denního minima zatížení	[MW]	[%]
Spotřeba brutto bez čerpání PVE [MWh]	4 837,3	100%
Jaderné elektrárny (JE)	2 999,1	62%
Parní elektrárny (PE)	3 043,9	63%
Paroplynové, plynové el (PPE+PSE)	561,7	12%
Vodní elektrárny (VE)	91,9	2%
Přečerpávací vodní el. (PVE)	0,0	0%
Fotovoltaické el. (FVE)	6,3	0%
Větrné el. (VTE)	43,7	1%
Ostatní	0,0	0%
Saldo	-1 857,1	-38%
Čerpání PVE	-52,3	-1%

zdroj dat: výkaz ERÚ-3



Nasazování zdrojů z hlediska optimálního provozu

- Musí být zajištěno optimální pokrytí DDZ s minimálními náklady na výrobu
- Náklady výrobních bloků sestávají ze dvou složek
 - Složka nezávislá na výkonu bloku
 - Složka závislá na výkonu bloku (zejména náklady na palivo)
- Hledáme optimální rozložení zatížení na jednotlivé elektrárny

Nasazování zdrojů z hlediska optimálního provozu

- Hledáme minimum nákladové funkce N (součet nákladových funkcí jednotlivých jednotek) s omezující podmínkou B (bilance výkonů)

$$N = \sum_{i=1}^M N_i \text{ a } B = \sum_{i=1}^M P_i = P$$

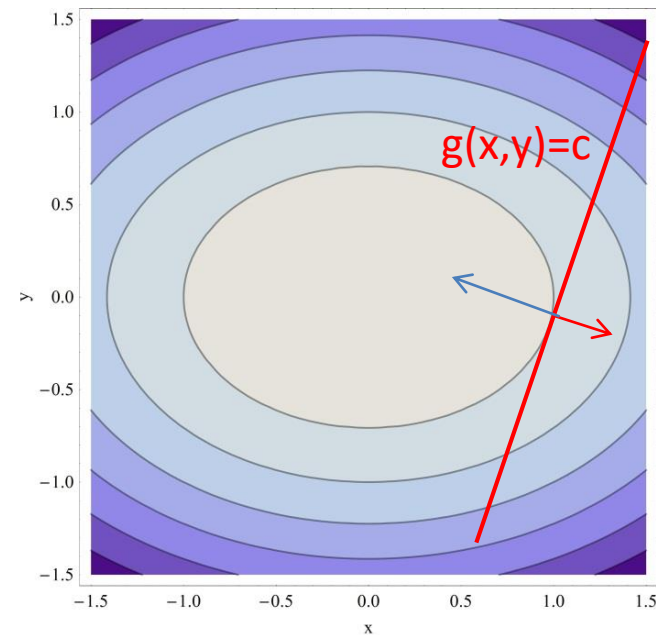
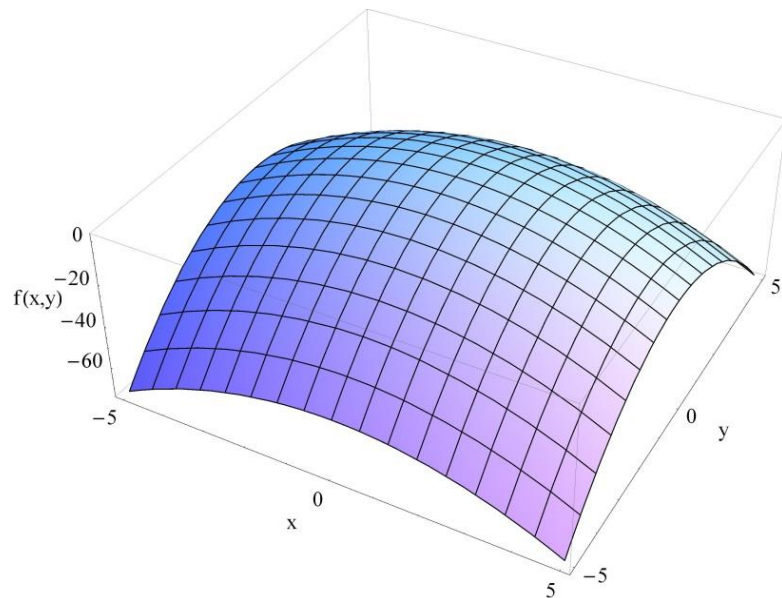
kde N_i jsou nákladové funkce elektráren, P_i výkony elektráren a P je zatížení elektrizační soustavy

Vázané extrémny funkcí více proměnných

- **Vázané extrémny**
 - Optimalizační problém
 - Hledáme extrém funkce $f(x,y)$
 - Vázaný podmínkou $g(x,y)=c$
 - Předpokládejme, že f a g mají spojité první parciální derivace
 - Lagrangeova funkce je definována jako
$$L(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda(g(x, y) - c)$$
 - Extrémny nalezneme řešením rovnice
$$\nabla L(x, y, \lambda) = 0$$

Vázané extrémy funkcí více proměnných – geometrická představa

- Geometrická přestava vázaných extrémů



Pro extrém funkce f na g musí být gradienty f a g rovnoběžné, tedy

$$\nabla f = -\lambda \nabla g$$

$$\nabla f + \lambda \nabla g = 0$$

Nasazování zdrojů z hlediska optimálního provozu

- Lagrangeova funkce pro optimální rozdělení výroby

$$L(P_1, P_2, \dots, P_n, \lambda) = N + \lambda B = \sum_{i=1}^M N_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^M P_i - P \right)$$

- Pak pro minimum musí být splněny podmínky

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_1} &= \frac{\partial N_1}{\partial P_1} + \lambda \\ \frac{\partial L}{\partial P_2} &= \frac{\partial N_2}{\partial P_2} + \lambda \\ &\vdots \\ \frac{\partial L}{\partial P_M} &= \frac{\partial N_M}{\partial P_M} + \lambda \\ \Rightarrow -\lambda &= \frac{\partial N_1}{\partial P_1} = \frac{\partial N_2}{\partial P_2} = \dots = \frac{\partial N_M}{\partial P_M} \end{aligned}$$

Příklad

- V elektrárně pracují dva bloky o $P_{n1}=P_{n2}=100\pm 20$ MW. Výrobní náklady prvního bloku jsou $N_1 = 50000 + 250P_1 + 40P_1^2$ (Kč/h) a druhého bloku $N_2 = 45000 + 150P_2 + 50P_2^2$ (Kč/h). Jaké je optimální pokrytí celkového výkonu $P_c=210$ MW?
 - Lagrangeova funkce

$$L = N_1(P_1) + N_2(P_2) + \lambda(P_1 + P_2 - P_c)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = 250 + 80P_1 + \lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_2} = 150 + 100P_2 + \lambda$$

$$P_c = P_1 + P_2$$

Příklad

$$\Rightarrow P_1 = 116 \text{ MW}, P_2 = 94 \text{ MW}, \lambda = -9539 \text{ Kč/MWh}$$

- Optimum se nachází v regulačních možnostech obou bloků a je možné ho provozovat

Zatěžovatel soustavy

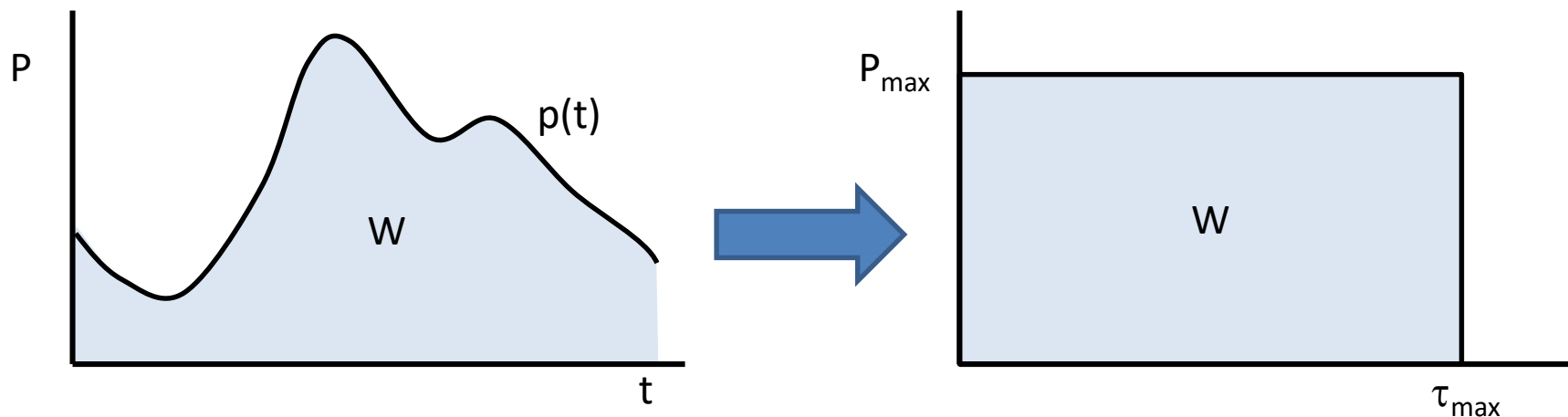
$$\xi = \frac{P_{avg}}{P_{max}} = \frac{\tau_{max}}{T}$$

- Poměr středního výkonu k maximálnímu výkonu, při konstantním U je to též poměr příslušných proudů
- Ideálně $\xi=1$, čím více se blíží ideální hodnotě, tím je provoz hospodárnější a levnější

Doba využití maxima

- Poměr elektrické práce za sledované období k maximálnímu zatížení

$$\tau_{max} = \frac{W}{P_{max}} = \frac{1}{P_{max}} \int_0^T p(t) dt$$



Doba plných ztrát

- Doba provozu s maximálním zatížením P_{\max} , za kterou se dosáhne stejných ztrát elektrické práce jako ve sledovaném období T při zatížení $p(t)$

Ztrátová práce A_z

$$A_z = R \int_0^T I^2(t) dt = RI_{ef}^2 T = RI_{ef}^2 T \left(\frac{\xi I_{\max}}{I_{avg}} \right)^2 = \overset{P_{zm}}{RI_{\max}^2} T \overset{\tau_z}{\left(\frac{\xi I_{ef}}{I_{avg}} \right)^2}$$

Doba plných ztrát

$$\tau_z = T \left(\frac{\xi I_{ef}}{I_{avg}} \right)^2 = T \left(\frac{I_{ef}}{I_{\max}} \right)^2 = \frac{\int_0^T i^2(t) dt}{I_{\max}^2} \quad \xi = \frac{I_{avg}}{I_{\max}}$$

Za předpokladu U a $\cos \varphi$ konstantní je doba plných ztrát:

$$t_z = \frac{1}{P_{\max}^2} \int_0^T p(t)^2 dt$$

Činitel využití a soudobosti

- Zařízení v provozu nemusí být plně zatížena, pro potřeby dimenzování se zavádí následující činitele
- **Činitel využití** – poměr skutečně odebíraného výkonu spotřebičů, které jsou současně v chodu k instalovanému výkonu všech spotřebičů

$$k_z = \frac{\sum P_s}{\sum P_n} \leq 1$$

- **Činitel soudobosti** – poměr jmenovitých výkonů spotřebičů, které jsou současně v chodu k instalovanému výkonu všech spotřebičů

$$k_s = \frac{\sum P_{na}}{\sum P_n} \leq 1$$

Součinitel náročnosti

- Podíl maximálního výkonu zařízení k jeho instalovanému výkonu

$$\beta = \frac{P_{max}}{P_i}$$

- Součinitel β lze také stanovit jako

$$\beta = \frac{k_s k_z}{\eta_r \eta_z}$$

kde η_r je účinnost rozvodu, η_z je účinnost zařízení

Výpočtové zatížení a proud

- Výpočtové zatížení se využívá pro dimenzování napájecího zdroje, rozvoden, napájecích vedení a napájecích transformátorů

$$P_p = P_i \beta$$

- Výpočtový proud lze stanovit ze vztahu

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3}U \cos \varphi},$$

kde U je sdružená hodnota napětí a $\cos \varphi$ je účinník