

# MOŽNOSTI PREDIKCE DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ LOPAT OBĚŽNÝCH KOL KAPLANOVÝCH A DĚRIAZOVÝCH TURBÍN.

Miroslav VARNER, Viktor KANICKÝ, Vlastislav SALAJKA  
ČKD Blansko Strojírny, a. s.

## Anotace

Uvádí se výsledky teoretických prací zaměřených na predikování dynamického chování lopat oběžných kol Kaplanových a Děriazových turbin. Výsledky výpočtů se porovnávají s parametry kmitání lopat stanovených experimentálně. Nejistota predikce frekvencí kmitání lopat oběžných kol se standardní úrovní návrhu za běžných provozních podmínek nepřesahuje 8% z vypočítaných hodnot vlastních frekvencí v neproudící vodě.

## Úvod

Stanovení parametrů kmitání lopat oběžných kol Kaplanových a Deriazových turbin je nezbytné pro posouzení jejich bezpečnosti vůči únavovému porušování. V současné době je možno počítat parametry kmitání lopat s uvážením obklopující neproudící kapaliny.

Řešení parametrů kmitání lopat v proudící kapalině, tj. složitěho problému hydroelasticity, je v konstrukční praxi realizovatelné jako řešení přibližné. Toto přibližné řešení problému, tj. stanovení odezvy na zatížení proudící vodou, spočívá v superpozici odezvy na zatížení při vnuceném přetvoření lopaty v neomezeném neproudícím vodním prostředí dané hustoty a odezvy na spojitě hydrodynamické zatížení explicitně definované pro vodu obtékající nepřetvořenou lopatu v klidu.

Přístupnost experimentálních poznatků o kmitání lopat v proudící vodě byla důvodem, který nás vedl k hodnocení odezvy lopaty na hydrodynamické zatížení inženýrským přístupem.

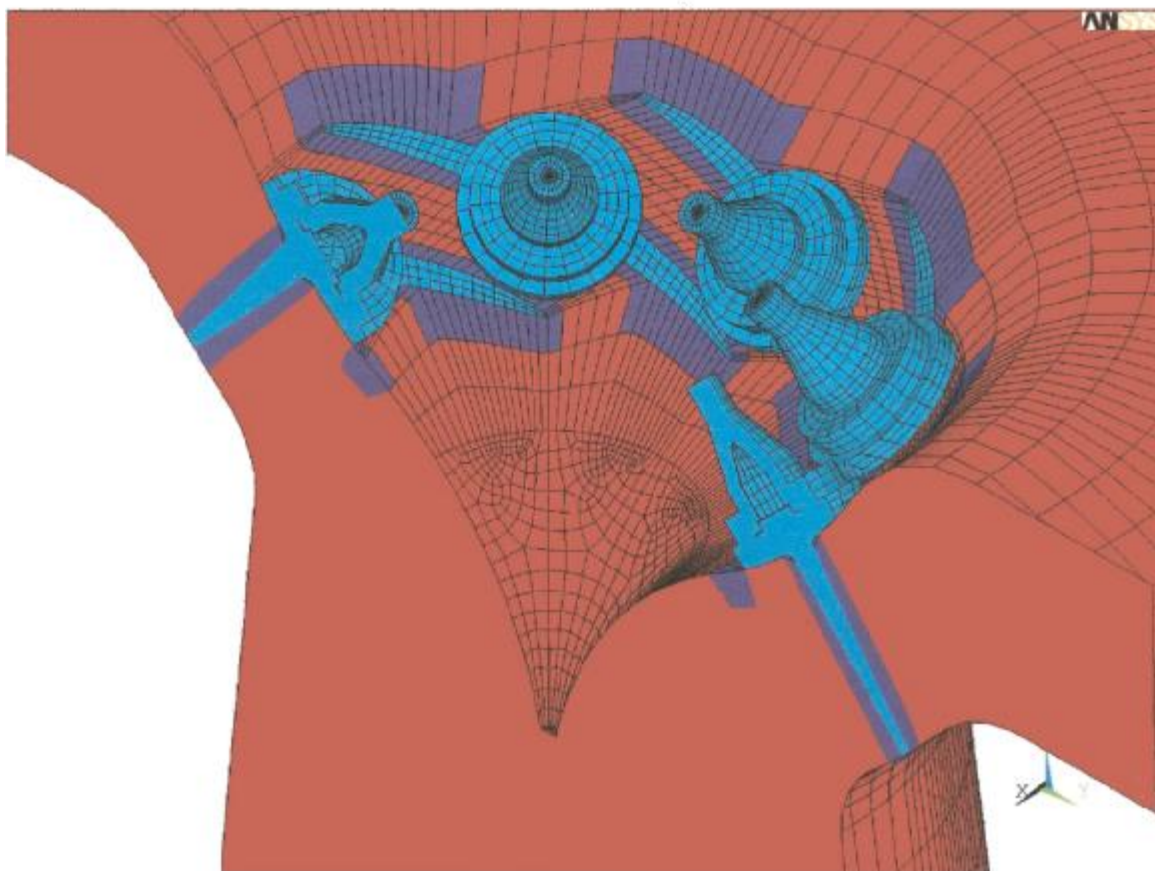
Tento přístup je založen na hodnocení vlivu hydrodynamických sil na součinitele snížení frekvencí rezonančního kmitání vypočítaného metodou konečných prvků pro případ neproudící vody. Vliv hydrodynamických sil na kmitání lopat je explicitně zahrnut při provozu stroje nebo při experimentálních studiích kmitání lopat zavřeného oběžného kola v neproudícím vodním prostředí. Hodnocení vlivu hydrodynamických sil na kmitání lopat lze tedy provést porovnáním výsledků výpočtu kmitání lopat v neproudící vodě s výsledky měření za provozu a s výsledky experimentálních studií kmitání lopat zavřeného oběžného kola.

## Vlastní kmitání oběžných lopat v neproudící vodě

Interakce konstrukce s vodním prostředím má pro řešení problematiky dynamického namáhání lopat oběžných kol dominantní význam. Inerciální účinky urychlovaných částic kapaliny na kmitající lopatu se vyjadřují přídatnou hmotností kapaliny. Profesionální programové systémy na bázi metody konečných prvků umožňují zahrnout přídatnou hmotnost kapaliny bez nutnosti hrubého

zjednodušení jak skutečného tvaru modelovaných konstrukčních částí ve styku s kapalinou, tak kapalinové oblasti. Výpočtové modely vytvořené pro stanovení vlastních frekvencí lopaty zahrnují náboj oběžného kola osazený lopatami příslušného profilu a kapalinovou oblast nad i pod lopatami včetně vrstvy kapaliny v mezeře mezi lopatami a stěnou komory. Hranice kapalinové oblasti byly radiálně resp. radiaxiálně definovány povrchy savky, komory oběžného kola, zavřených rozváděcích lopat, víka a lopatkových kruhů turbíny a náboje oběžného kola s kuželem – obr.1. Vlivem přidavné

Řez modelem oběžného kola a kapalinové oblasti



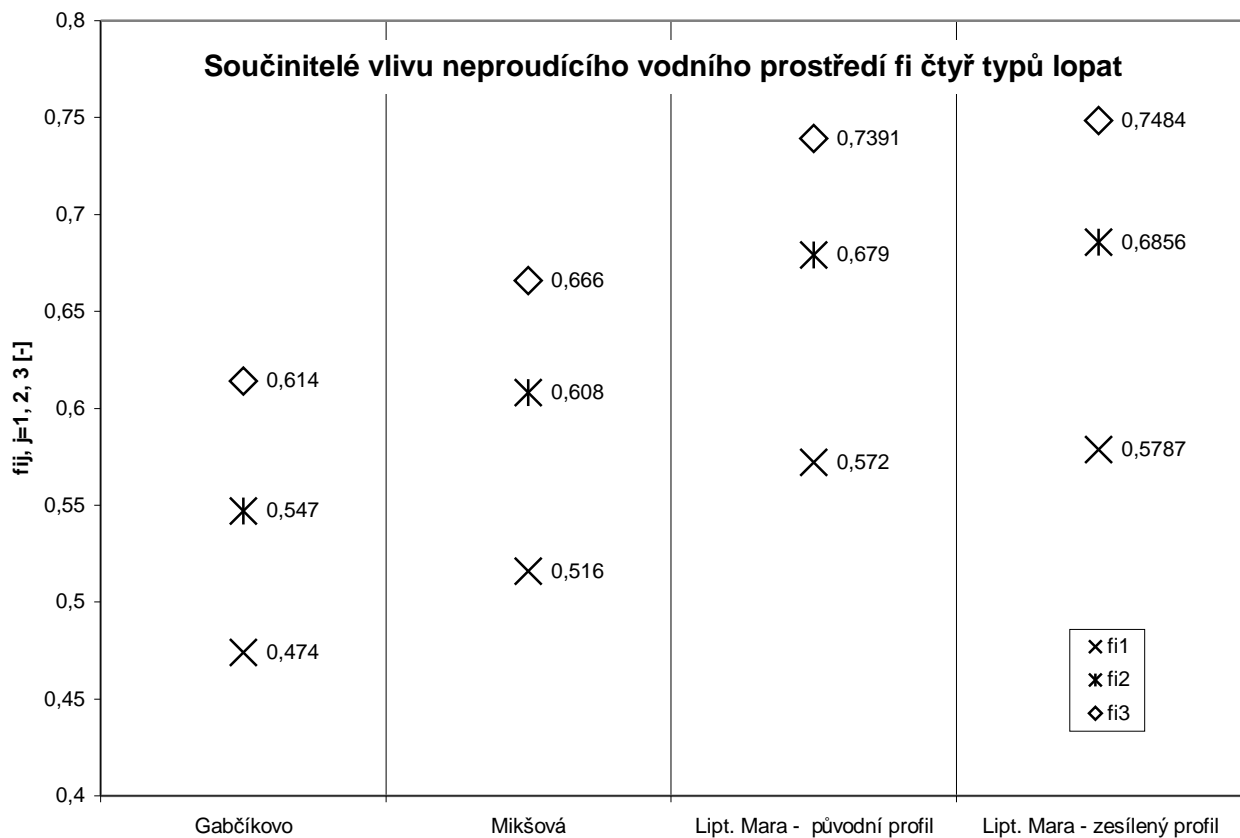
obr. 1

hmotnosti vody dochází k snížení vlastních frekvencí kmitání lopat, které je vyjádřeno součiniteli vlivu neproudícího vodního prostředí  $j_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  :

$$j_i = \frac{f_{i,voda}}{f_i},$$

kde  $f_{i,voda}$  je i-tá vlastní frekvence kmitání ve vodním prostředí,  $f_i$  je i-tá vlastní frekvence kmitání ve vakuu nebo vzduchu (vliv vzduchu na kmitání lopat je zanedbatelný).

Součinitelé vlivu vody jsou závislé i na geometrickém tvaru lopat. Pro čtyři typy lopat jsou hodnoty prvních třech součinitelů znázorněny v grafu obr. 2. Součinitelé vlivu vody nejsou významně



obr. 2

citlivé na okrajové podmínky modelující uložení lopat [1]. Pokud jsou při výpočtu vlastních frekvencí lopat ve vodě uvažovány vůle mezi lopatami oběžného kola a komorou oběžného kola, jsou vypočítané hodnoty součinitelů vlivu vody velmi málo odchylené od hodnot součinitelů vlivu vody stanovených experimentálně [1]. V konstrukční praxi je však pro posouzení bezpečnosti vůči rezonančnímu kmitání lopat nutné stanovit hodnoty vlastních frekvencí kmitání ve vodním prostředí.

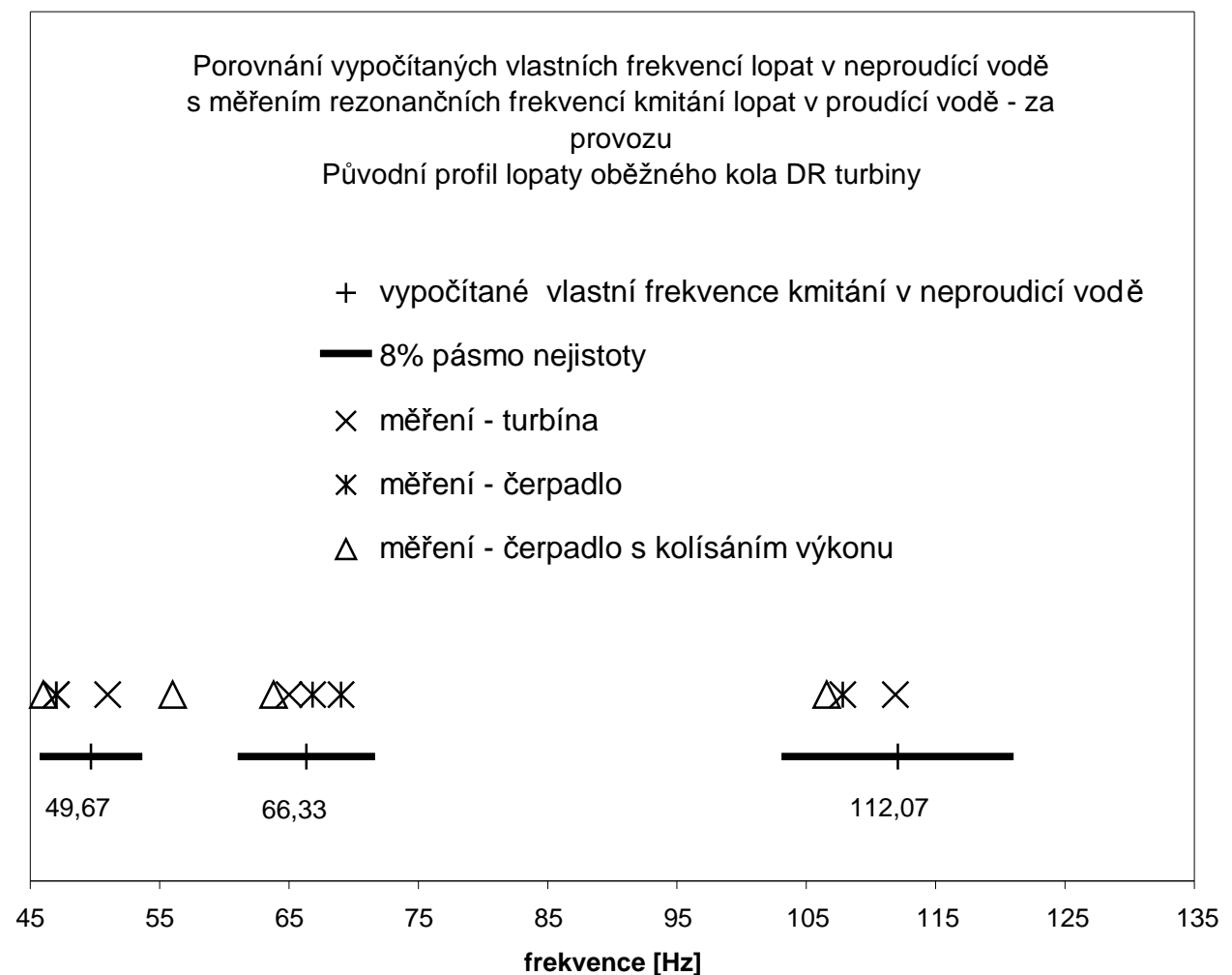
Hodnoty vlastních frekvencí kmitání na vzduchu i ve vodě jsou významně ovlivněny okrajovými podmínkami výpočtového modelu. V ČKD Blansko Strojírny, a.s. byla realizována studie vlivu okrajových podmínek modelujících vazbu příruby lopaty a čepu a uložení čepu v náboji oběžného kola na hodnoty vlastních frekvencí lopat na vzduchu. Výsledky studie umožňují optimalizovat okrajové podmínky výpočtového modelu s cílem dosáhnout shodu hodnot vlastních frekvencí stanovených výpočtem a experimentálně [2].

Nejistota vypočítaných hodnot vlastních frekvencí kmitání lopat v neproudícím vodním prostředí zahrnující vliv imperfekcí reálného provedení lopat, vliv okrajových podmínek výpočtového modelu a chybu výpočtu nepřesahuje 4% z hodnot jednotlivých vlastních frekvencí.

## Kmitání lopat oběžných kol v proudící kapalině

V současné době nejsou k dispozici výsledky teoretických řešení problému kmitání lopat oběžných kol v proudící kapalině. K posouzení oprávnění předpovídat parametry kmitání lopat v proudící vodě z vypočtených parametrů kmitání lopat v neproudící vodě v prvním přiblížení byly využity výsledky měření napětí lopat za provozu [3], [5].

Dériazova čerpadlová turbína PVE Liptovská Mara: V 70. letech bylo provedeno tenzometrické měření napětí lopat oběžného kola v turbínovém a čerpadlovém provozu. Vyhodnocené výsledky měření zahrnující zejména odhady funkce spektrální výkonové hustoty procesů napětí lopat [3], [4] byly využity k určení hodnot dominantních frekvencí kmitání lopat. Výpočet vlastních tvarů kmitu a vlastních frekvencí kmitání lopat byl proveden v rámci výzkumu ČKD Blansko Strojírny, a.s. [2].

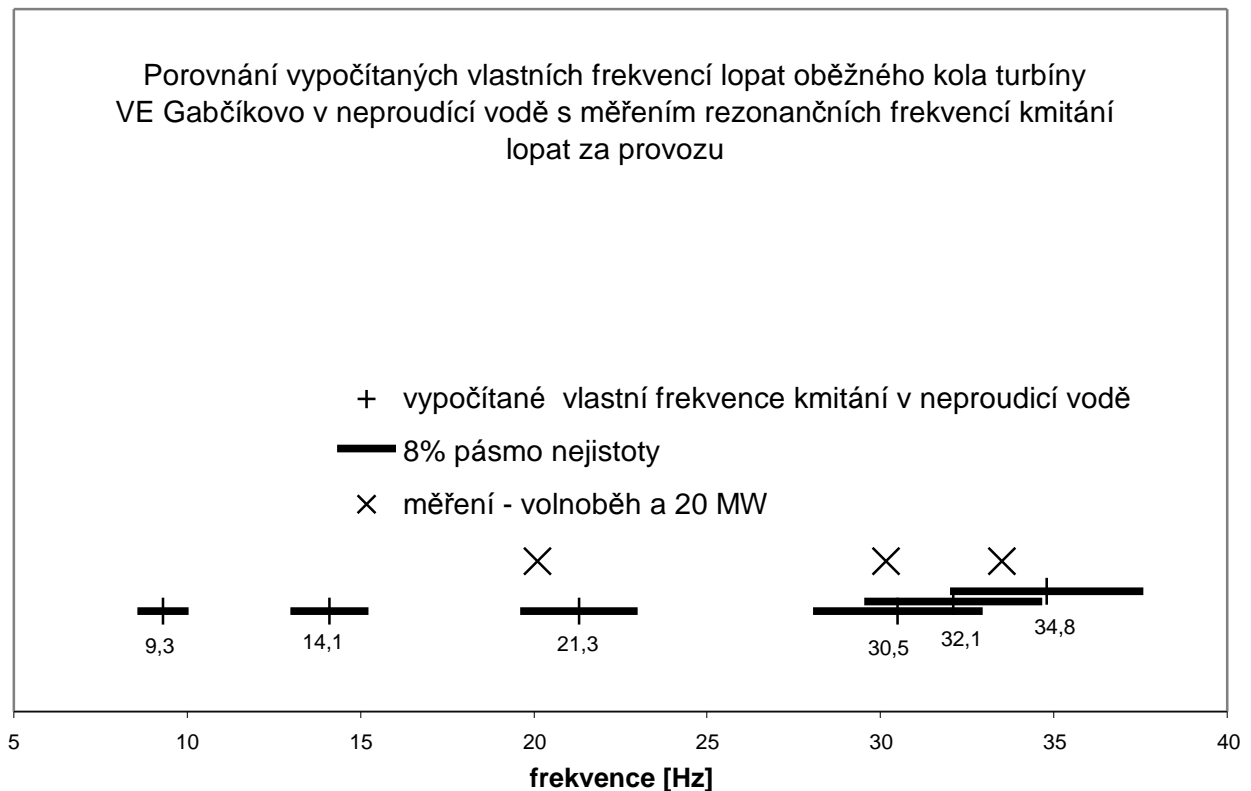


obr. 3

Souhrnné znázornění vypočítaných vlastních frekvencí v neproudící vodě a jejich 8% pásmo nejistoty a frekvence kmitání lopat zjištěné při turbínovém a čerpadlovém provozu jsou uvedeny na obr. 3. Rozdíly frekvencí kmitání lopat při turbínovém a čerpadlovém provozu mohou být způsobeny

změnami reálného uložení lopat v ložiskách či vlivem hydrodynamických sil v uvedených typech provozu.

Kaplanova turbína VE Gabčíkovo: Tenzometrické měření napětí na lopatě za provozu se uskutečnilo při uvádění do provozu soustrojí TG5 v roce 1993 [5]. Na obr. 4 jsou znázorněny vypočítané vlastní frekvence v neproudící vodě a hodnoty dominantních frekvencí zjištěných při



obr. 4

výkonu 20 kW a při volnoběhu. Umístění tenzometru, jehož signál byl vyhodnocován, je hlavním důvodem absence experimentálně zjištěného kmitání nižšími vlastními tvary kmitů. Navíc je experimentálně ověřeno, že kmitání lopat nižších tvarů kmitů se budí obtížně [6].

Použijeme-li k predikci frekvencí kmitání lopat za provozu vypočítané hodnoty vlastních frekvencí ve proudící vodě, nepřesahuje nejistota predikce za běžných provozních podmínek 8% z vypočítaných hodnot vlastních frekvencí. Výjimkou je nestandardní čerpadlový provoz s kolísáním příkonu, kdy se pravděpodobně významně uplatňují hydrodynamické účinky proudící vody.

## Závěr

Aplikace profesionálních systémů programů metody konečných prvků umožňují věrohodné stanovení vlastních frekvencí kmitání lopat oběžných kol Kaplanových a Dériazových turbín v neproudící vodě.

Nejistota predikce frekvencí kmitání lopat oběžných kol se standardní úrovní návrhu za běžných provozních podmínek nepřesahuje 8% z vypočítaných hodnot vlastních frekvencí v neproudící vodě.

Za jiných okolností je nutno uvažovat nejistoty odhadu dynamického chování lopat oběžných kol za provozu vlivem hydrodynamických účinků.

## Použité podklady

1. VARNER, M. – KANICKÝ, V. – SALAJKA, V.: Výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitů lopaty oběžného kola Kaplanovy turbíny ve vodě, Sborník HYDROTURBO 2001, Podbanské, 2001.
2. HUŇKA, P. – VARNER, M.: Změna součinitelů snížení vlastních frekvencí rezonančního kmitání lopat ve vodě vlivem proudění vody, výzkumná zpráva ČKD Blansko Strojírny, a.s. č. 4OAM 9962-667, Blansko, 2002.
3. VARNER, M.: Vyhodnocení měření napětí na lopatě OK TG3 DR2 PVE Liptovská Mara, výzkumná zpráva ČKD Blansko, a.s. č. 4OTE 9961-934, Blansko, 1985.
4. VARNER, M: - SVĚRÁK, F.: Vyhodnocování provozních měření systémem EDYZ 5, Strojírenství, 37, 181, 1987.
5. PŮLPITEL, L.: Měření při zkoušce bezenergetického provozu TG5 VE Gabčíkovo, výzkumná zpráva ČKD Blansko, a.s. č. 4VYU 9962-299, Blansko, 1993.
6. TVRZ J.: Experimentální stanovení vlastních frekvencí lopat oběžného kola soustrojí TG3 PVE Liptovská Mara, výzkumná zpráva SVÚSS č.: 82 – 03129, SVÚSS Praha – Běchovice, 1982

## Autoři

Ing. Miroslav VARNER, ČKD Blansko Strojírny, a.s., Gellhornova 1, 678 18 Blansko,  
tel.: 0506 40 2023, fax: 0506 414060, e-mail: [oam@ckdblansko.cz](mailto:oam@ckdblansko.cz), [varner@wo.cz](mailto:varner@wo.cz)

Doc. Ing. Viktor KANICKÝ, CSc, Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, 613 00 Brno,  
tel. – fax: 0545572697

Ing. Vlastislav SALAJKA, CSc, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně, Veveří  
95, 667 37 Brno, tel.: 05 41147365, e-mail: [smsal@fce.vutbr.cz](mailto:smsal@fce.vutbr.cz)