

Využití metody konečných prvků při řešení problematiky dimenzování ocelových konstrukcí

Anwendung der Methode von Endelementen zur Lösung der Problematik von Auslegung der Stahlkonstruktionen

Der Beitrag informiert über die Grundprinzipien der Methode von Endelementen und ihre Applikation in VÚHU Most. Der Schwerpunkt des Einsatzes liegt in der Lösung der statischen, stabiliten und dynamischen Berechnungen der Raum- und Ebenestahlkonstruktionen im Bauwesen und Maschinenbau. Es werden weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise für Kontroll der Festigkeit von technologischen Verkehrsbrücken, Wasserbehältern, Mastfachwerken und Entwurf der Antriebstationen der Bandanlage beschrieben. Die Methode ist ebenso bei Rekonstruktionen und Verbesserungen der Stahlkonstruktionen der Tagebaugroßgeräte einzusetzen.

Bei der Lösung der konkreten Aufgaben ist das Programmsystem FEAT Version 4.0 von der Firma SMARTsoft Praha GmbH angewendet, das sich auf der Deformationsvariante der Methode von Endelementen beruht.

Utilization of the final element method at the problem solution of steel structure dimensioning

The submitted article deals with basic principles of final element method and its application in the Brown Coal Research Institute, j.s.c. The centre of method utilization is in solution of static, stability and dynamical calculations of construction and machinery space and plane steel structures. The article describes the method use for strength check of technological transport bridges, water reservoir, mast framed structure and proposal of driving station of belt conveyor system (D/D). Further method utilization is at reconstruction and modification of steel structure of opencast mine machine and equipment.

At solution of concrete tasks it is used the FEAT programme system version 4.0 of the SMARTsoft Prague firm, s.r.o., which is based on deformation variant of final element method.

Использование метода конечных элементов при решении проблематики dimensionирования стальных конструкций

Предлагаемая статья занимается основными принципами метода конечных элементов и его приложения в Научно-исследовательском институте бурого угля, а/о, г. Мост. Центр тяжести использования метода заключается в решении расчетов статики, устойчивости и динамики строительных и механических пространственных и плоских стальных конструкций. Статья указывает на применение метода для контроля прочности мостов технологического транспорта, водосборника, сквозной решетчатой опоры и проекта приводной станции магистрального конвейерного транспорта. Дальнейшее использование может метод найти при реконструкциях и приспособлениях стальных конструкций машин и механизмов работающих на разрезах.

При решении конкретных задач используется программная система FEAT версия 4.0 фирмы SMARTsoft Прага, на основании деформационного варианта метода конечных элементов.

Využití metody konečných prvků při řešení problematiky dimenzování ocelových konstrukcí

Předkládaný článek pojednává o základních principech metody konečných prvků a její aplikaci ve Výzkumném ústavu pro hnědé uhlí, a.s. Těžiště využívání metody je v řešení statických, stabilitních a dynamických výpočtů stavebních a strojních prostorových i rovinných ocelových konstrukcí. Článek ukazuje použití metody pro pevnostní kontrolu technologických

dopravních mostů, vodojemu, stožárové příhradové konstrukce a návrhu poháněcí stanice DPD. Další využití metody je při rekonstrukcích a úpravách ocelových konstrukcí lomových strojů a zařízení.

Při řešení konkrétních úloh je využíván programový systém FEAT verze 4.0 od firmy SMARTsoft Praha, s.r.o., který je založen na deformační variantě metody konečných prvků.

V technickém odboru Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí je velmi často třeba řešit dimenzování ocelových konstrukcí jako součást realizace zakázek typu

- posuzování stavu stávající ocelové konstrukce
- projektování ocelových konstrukcí
- navrhování úprav současných ocelových konstrukcí.

Základním krokem při dimenzování ocelové konstrukce (dále jen OK) je stanovení vnitřních sil v jejích částech. Zde je třeba dodat, že převládajícím typem ocelových konstrukcí jsou konstrukce prutové – příhradové či rámové.

V minulosti se ke stanovení vnitřních sil v uvedených typech konstrukcí používala především metoda Cremonova, metoda rovnováhy ve styčnicku a pro rámové konstrukce vztahy známé ze stavební mechaniky. Nedostatky těchto metod zejména při řešení příhradových konstrukcí jsou známy.

Jsou to:

- pouze kloubové spojení jednotlivých prutů
- pouze styčnickové zatížení
- velká pracnost při řešení rámových konstrukcí.

Počátkem 90. let s nástupem výpočetní techniky byly tyto metody nahrazeny metodou konečných prvků (dále jen MKP), používanou hojně v západním světě již od 60. let. MKP odstraňuje nedostatky dříve používaných metod řešení a navíc umožňuje na shodném principu řešit i stěnové, deskové a skořepinové konstrukce.

Metoda konečných prvků je metodou energetickou, založenou na principu virtuálních prací, respektive principu virtuálních posunutí, kde práce skutečných sil na virtuálních posunutích je základem tzv. deformační varianty metody konečných prvků. MKP je metoda přibližná. Její výsledky konvergují k výsledkům přesného analytického řešení s rostoucím počtem prvků, na něž je řešená ocelová konstrukce rozdělena. Při řešení vnitřních sil v prutových konstrukcích však dává přesné výsledky (shodné s výsledky získanými přesnou deformační metodou) při použití jednoosového prvku – elementu s kubickým průběhem deformace po délce prvku a lineárně statického výpočtu (např. programové vybavení FEAT4.0).

Analýza konstrukce – stanovení vnitřních sil v jednotlivých částech konstrukce metodou konečných prvků, se provádí v následujících krocích:

1. Sestavení geometrického modelu konstrukce včetně výběru typu prvků, stanovení uložení a zatížení konstrukce. Algoritmus metody kromě jiného vytvoří vektor zatížení, vektor deformací, transformační matice prvků a matici tuhosti konstrukce.
2. Řešení podmínek rovnováhy ve styčných bodech (uzlech) konstrukce, tj. řešení soustavy rovnic, daných maticovým zápisem

$$\mathbf{S} + \mathbf{R}^f = \mathbf{K} \cdot \mathbf{r},$$

- kde S vektor příčného styčnickového zatížení
 R^f vektor transformovaného zatížení prvků
 K matice tuhosti konstrukce
 r vektor posunutí (deformací) konstrukce v uzlových bodech

Výsledkem řešení je vektor posunutí r .

3. Zpětný výpočet

- deformací na prvcích OK
- vnitřních sil na prvcích OK
- reakcí v uložení OK

Metoda konečných prvků klade velké nároky na výpočetní kapacitu. Její deformační varianta je dobře algoritmizovatelná a proto nastal její rozvoj s nástupem a zdokonalováním počítačů, zejména osobních.

Na softwarovém trhu je dnes celá řada produktů, které nabízejí řešení analýzy ocelových konstrukcí pomocí MKP, a to i od českých firem. Výzkumný ústav pro hnědé uhlí disponuje dvěma produkty:

- programové vybavení FEAT4.0 od firmy SMARTsoft
- programové vybavení NEXIS 2.0 od firmy FEMCONSULTING.

Oba produkty v zakoupené konfiguraci umožňují komplexní lineárně statické a stabilitní řešení konstrukce. Ve FEAT4.0 je navíc možno provést vyšetření konstrukce na vlastní kmitání. Programy umožňují řešit konstrukce prutové (příhradové i rámové), deskové, stěnodeskové i skořepinové. Obsahují prvky jednoosové i plošné trojúhelníkové a čtyřúhelníkové s vlastnostmi vhodnými pro řešení tenkých i tlustých desek a stěnodesek (FEAT4.0). Oba programy jsou dále vybaveny moduly pro dimenzování ocelových konstrukcí podle ČSN 73 1401-89 a EC3 (prakticky ČSN 73 1401-94 při použití národních součinitelů spolehlivosti materiálu), tj. umožňují posouzení ocelové konstrukce z hlediska únosnosti i použitelnosti. MKP a navazující dimenzační programy navíc umožňují relativně snadnou optimalizaci návrhu konstrukce, tj. zpravidla požadavek minimální hmotnosti konstrukce, z hlediska využití vlastností použitého materiálu, metodiky mezních stavů a výrobních možností.

Velikost řešené konstrukce je prakticky omezena pouze velikostí pevného disku použitého počítače. Například úloha o cca 6960 prvcích si již vyžádala kolem 100 MB volné pracovní kapacity pevného disku. Celá úloha potom vyžadovala pro běh programu FEAT4.0 cca 130 MB kapacity pevného disku.

Větší zkušenosti jsou dosud s programovým vybavením FEAT4.0. S jeho pomocí byly úspěšně řešeny otázky dimenzování u následujících ocelových konstrukcí:

- technologické dopravní mosty v lokalitách MUS, a.s. a SD, a.s. – Doly Bílina
- statika vodojemu v lokalitě Doly Bílina
- věž výšky 48m prutové stavebnicové konstrukce pro anténní stožár
- podpěrné konstrukce horkovodních napáječů 1. severozápadní teplárenské, a.s.



Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 6

Technologické dopravní mosty

Důvody, které vedly k nutnosti dimenzování některých částí mostů nebo ke kontrole únosnosti hlavní nosné konstrukce mostu, byly následující:

- přetížení OK závěsným lešením při opravách
- přetížení OK novou technologií
- změna zatížení OK v důsledku změny konstrukce podlahy či opláštění mostu
- vyjmutí ztužujících prutů z původní konstrukce z technologických důvodů.

Vynášecí mosty B a C na závodě Kohinoor

Jako příklad lze uvést statické přepočty hlavních nosných ocelových konstrukcí vynášecích mostů B a C na závodě Kohinoor, které byly provedeny v rámci jejich opravy. Kromě jiného byly při opravě nahrazeny stávající betonové podlahy podlahami plechovými, přičemž bylo zjištěno značné orezivění příčníků spodního zavětrování.

Hlavní parametry mostů:

most	B	C
délka	33,85 m	32,75 m
šířka	3,30 m	3,30 m
výška	3,00 m	3,00 m
dopravník šířky	1400 mm	1400 mm
výkon	500 t.h ⁻¹	500 t.h ⁻¹
rychlost	1,68 m.s ⁻¹	1,48 m.s ⁻¹

Na obr. 1 – 3 jsou celkové pohledy na oba mosty a detail opravené podlahy.

Vodojem v lokalitě Doly Bílina – Úpravna uhlí Ledvice

V rámci doplnění stávající dokumentace byl proveden statický výpočet. Ocelová konstrukce vodojemu je navržena jako volně stojící stožár, vetknutý v patce do základu a na horním konci nesoucí nástavec - nádrž na vodu – tvaru rotačního elipsoidu. Stožár je tvaru komolého kužele se spodním průměrem 3 400 mm, horním průměrem 1 380 mm a výškou 33 149 mm. Tloušťka stěny stožáru je v rozmezí 14 až 18 mm. Tloušťka stěny nástavce je v rozmezí 5 až 20 mm. Vodní objem činí 150 m³. U této konstrukce bylo rozhodující posouzení na zatížení statickým a dynamickým větrem. To bylo rozloženo na konstrukci podle zákonů o obtékání válce a koule. Model byl vytvořen jako tenkostěnná skořepina z plošných prvků, jejichž vlastnosti odpovídají diskretní Kirchhoffově teorii.

Výpočet byl již poměrně náročný. Pro zajímavost jsou dále uvedeny parametry výpočtu:

- 6 960 prvků typu DKT
- 13 zatěžovacích stavů
- 20 412 rovnic
- doba výpočtu prvních tří vlastních frekvencí konstrukce cca 2,5 hod. na PC s procesorem Pentium II 233 MHz a 64 MB RAM

Bylo zjištěno, že max. výchylka v rezonanci při kvazidynamickém zatížení větrem činí 315 mm. Na obrázcích 4 a 5 je dobře viditelné zploštění skořepiny stožáru v místech max. deformace.

Šestiboká věž výšky 47,975 m pro anténní stožár

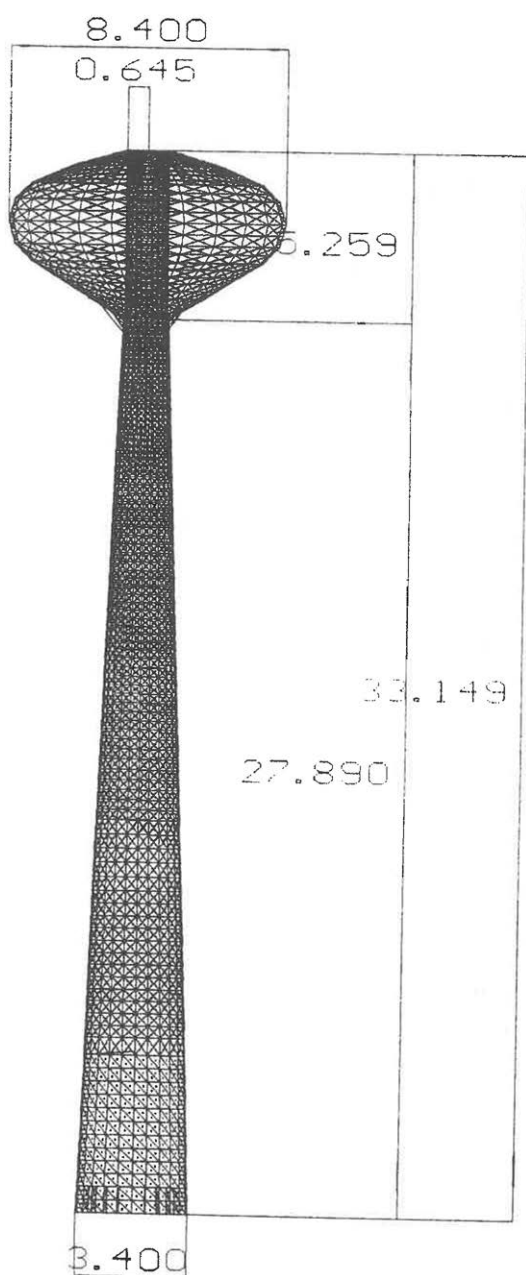
Statický výpočet byl prováděn z důvodu zvýšení věže o 8 m. Věž příhradové konstrukce má v půdorysu tvar šestiúhelníka o straně 3 m. Celá věž sestává ze sekcí o jednotné výšce 4 m a v nejvyšší sekci má věnec stažený do 1 bodu v ose věže ve výšce 47,975 m. V nejvyšším místě je zakončena anténním stožárem výšky 8 m. Na ochozech věže ve výškách 32 m a 40 m jsou umístěny parabolické antény $\varnothing$ 3 m a $\varnothing$ 2 m celkem po 4 kusech. Kromě stálých zatížení bylo uvažováno zatížení statickým a kvazidynamickým větrem, námrazou, sněhem a zatížení montážní. Úloha reprezentovala řešení modelu o 281 prutových prvcích a 17 zatěžovacích stavech. Pohled na model věže a věž před zvýšením je na obr. 6 a 7.

Hnací stanice DPD 1800 mm

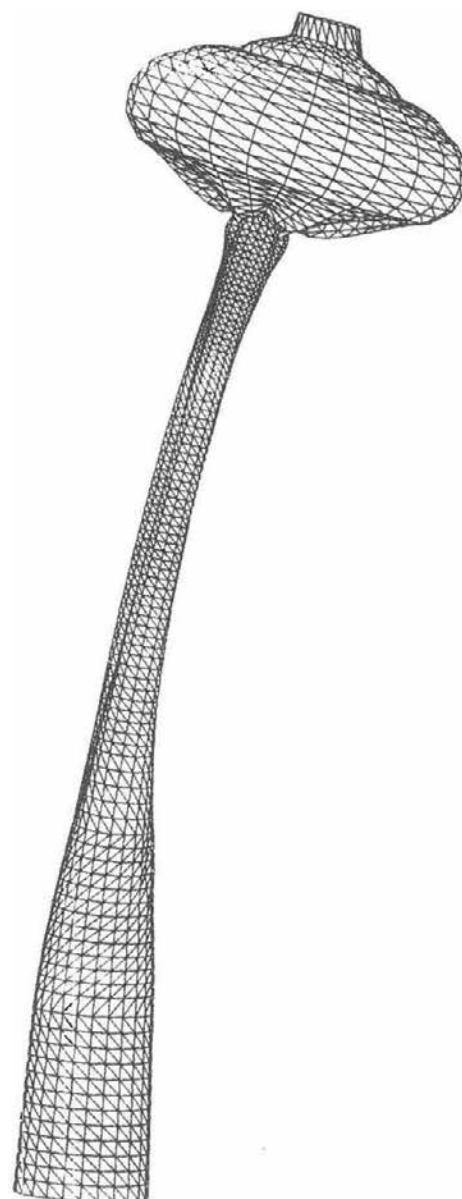
Statický výpočet stanice byl součástí projektu. Nosná ocelová konstrukce stanice je navržena jako příhradový most na dvou podporách s převislými konci. Obě podpory jsou dvoubodové s úložnými body na úrovni šířky systému ocelové konstrukce, tj. 2,8 m, a svými úložnými body jsou začepovány na pontonech. Na převislých koncích spočívají pohonné jednotky DPD a tlumící štít. Horní válečková stolice a portál s vrátkem napínání jsou uloženy na horních pásech nosné ocelové konstrukce. Vnitřní prostor konstrukce je vyplněn pásovými cestami a dráhou napínání. Ocelová konstrukce je zhotovena z válcovaných profilů HEB a IPE svařováním. Obě podpory jsou demontovatelné.

Vybrané parametry hnací stanice:

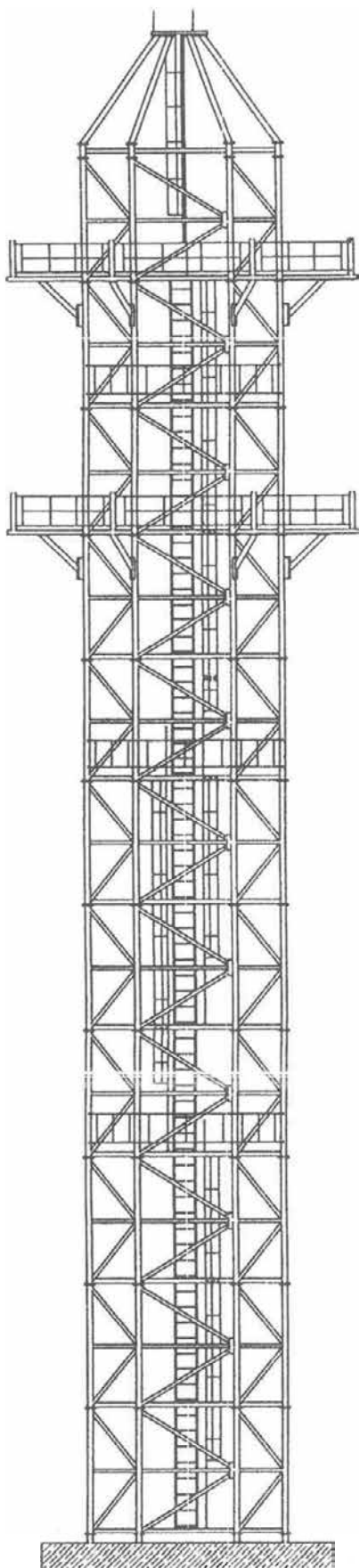
výkon		7 000 t.h ⁻¹
šířka pásu		1 800 mm
rychlost pásu		5 m.s ⁻¹
vzdálenost podpor		20 m podélně
2,8 m příčně		
hlavní rozměry		délka 51 430 mm včetně náběhového dílu
		šířka 9 280 mm včetně ochozů
		výška 8 050 mm včetně vrátku napínání
tlak na podložku		max. 0,07 MPa



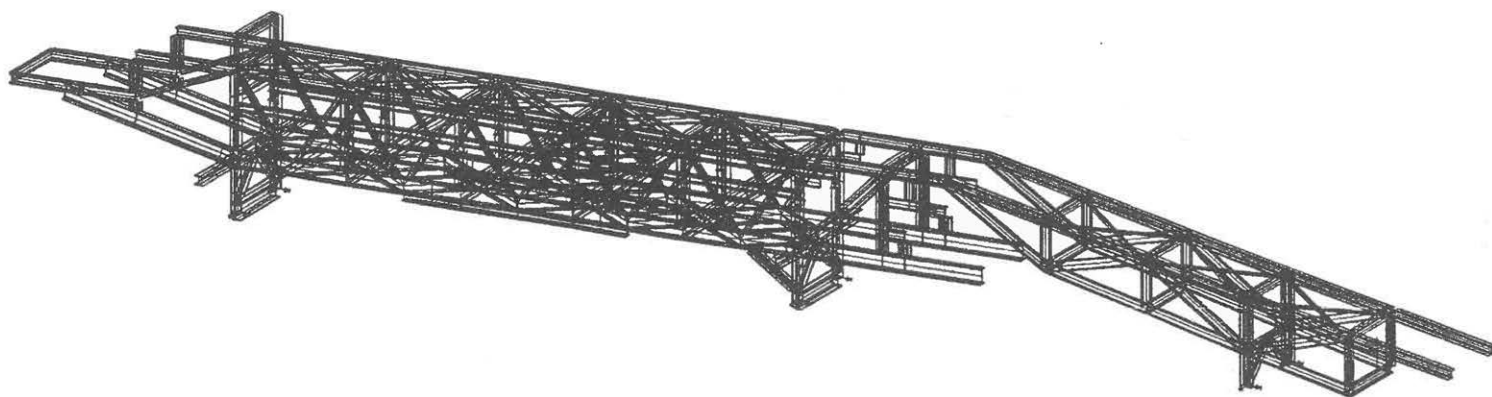
Obr. 4 Výpočtový model vodojemu 150 m³ - Doly Bilina



Obr. 5 Vodojem 150 m³ - deformovaný tvar



Obr. 7 Schéma O.K. šestiboké věže



Obr. 8 Výpočtový model hnací stanice DPD 1800

Výpočtový model stanice sestává ze 348 prutových prvků a obsahuje 44 zatěžovacích stavů. Dále řeší vnitřní síly v jednotlivých prutech stanice při poklesu jedné z podpor a při transportu stanice. Rovněž dimenzování jednotlivých částí ocelové konstrukce stanice bylo provedeno pomocí dimenzačních modulů programového vybavení podle ČSN 73 1401-94 v elastické oblasti. Celkový pohled na hnací stanici je na obr. 8.

Závěrem lze konstatovat, že aplikace MKP umožnila pracovníkům ústavu efektivně řešit úlohy, které by exaktními metodami byly řešitelné jen velmi obtížně, nebo které by klasickými výpočetními metodami nebylo možno zvládnout v požadovaném časovém limitu.

Literatura

1. ČSN 73 1401-98 - Navrhování ocelových konstrukcí
2. Uživatelská příručka FEAT4.0
3. Statický přepočet nosné ocelové konstrukce vynášecího mostu B na závodě Kohinoor. Zpráva VÚHU č.37/98
4. Statický přepočet nosné ocelové konstrukce vynášecího mostu C na závodě Kohinoor. Zpráva VÚHU č.38/98
5. Odborné posouzení ocelové konstrukce vodojemu 150 m³ včetně statického výpočtu. Zpráva VÚHU č.22/98
6. Statický výpočet ocelové konstrukce šestiboké věže pro výšku $H = 47,975$ m ... Zpráva VÚHU č.101/96
7. Statický výpočet hnací stanice DPD 1800. Zpráva VÚHU č.223/97