



FINITE ELEMENT ANALYSIS DYNAMICAL MODEL OF VVER 1000 NUCLEAR REACTOR CONTROL ROD DRIVE

P. Markov*, V. Svoboda**

Summary: *The presented poster deals with the Finite Element Analysis dynamical model of VVER 1000 nuclear reactor control rod drive (LKP-M/3). It describes the setting up of the calculation model supported by the CAD program I_DEAS as well as the construction of its boundary and initial conditions together with loading conditions specification at normal operation. The LKP-M/3 model consists of five principal parts that are slidingly supported in radial direction with one another while lengthwise they are subject to the elastic or free connection with stops that limit their relative motion. In addition, for each part, frequency-modal properties were computed using COSMOS/M environment that are important for subsequent dynamical analysis. The COSMOS/M calculation provided also the response to the excitation due to driving electro-magnets, mutual shocks between the facing parts, and the gravity. Having done this, we get the possibility to compute the trends in displacements, velocities, and accelerations in a particular part. Furthermore a procedure is described for establishing the peak stress in each part in the course of LKP-M/3 action. The procedure was applied to the calculation preliminary time-step, lift, and lowering time-steps and some of their combinations.*

1. Úvod

Lineární krokový pohon je hlavním výkonným členem řízení a ochrany reaktoru VVER1000. Je umístěn na nátrubku víka reaktoru v hermetické obálce (obr.1). Používá se k zasouvání nebo vysouvání závěsné tyče s regulačním orgánem do nebo z aktivní zóny reaktoru, dále ke stání regulačního orgánu v krajních a mezilehlých polohách a indikaci polohy regulačního orgánu. Umožňuje také pád regulačního orgánu do aktivní zóny v režimu havarijní ochrany a v případě porušení těsnosti pouzdra pohonu zamezuje samovolnému vysunutí regulačního orgánu z aktivní zóny vlivem tlakového spádu.

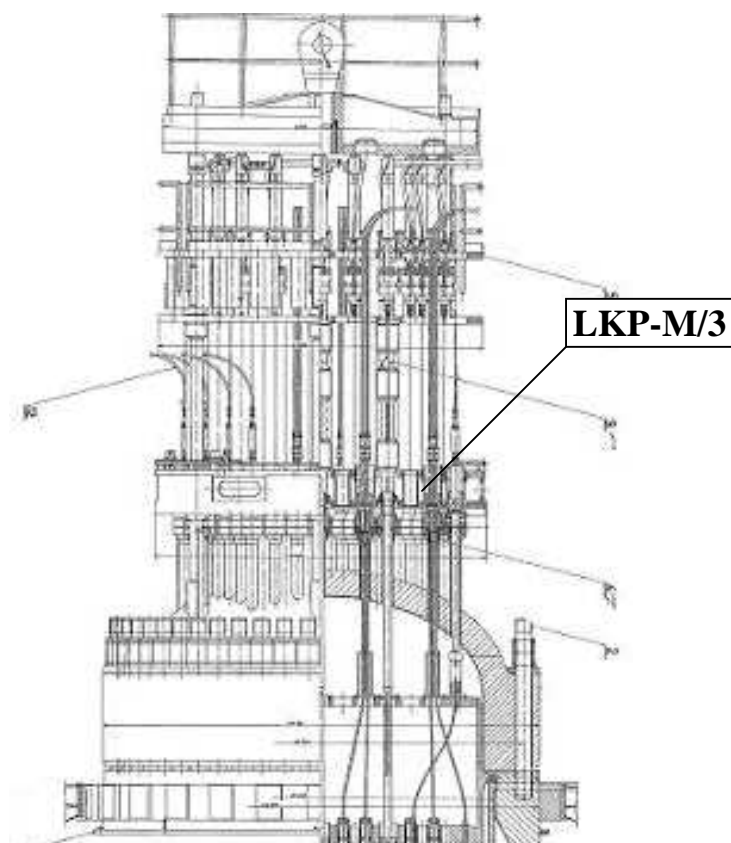
Na provozní spolehlivosti pohonů do značné míry závisí jak bezporuchový provoz reaktoru v normálních provozních režimech, tak i bezpečné odstavení reaktoru při všech úrovních zásahu havarijní ochrany. V současné době je ve ŠKODA JS a.s. vyvíjena třetí modernizovaná řada lineárních krokových pohonů (LKP-M/3).

Tento poster se zabývá sestavením výpočtového modelu a ukázkou výsledků dynamické analýzy chodu pohonu LKP-M/3 při normálních provozních podmínkách.

V případě potřeby bude možno tento model využít i pro analýzu činnosti tohoto zařízení při některých havarijních stavech (např. při zemětřesení).

* Ing. Petr Markov, CSc., ŠKODA JS a.s. Plzeň, tel.: +420 737 620 009; e-mail: petr.markov@seznam.cz

** Ing. Václav Svoboda, ŠKODA JS a.s. Plzeň, tel.: +420 378 042 961, fax: +420 378 042 407; e-mail: vaclav.svoboda@skoda-js.cz

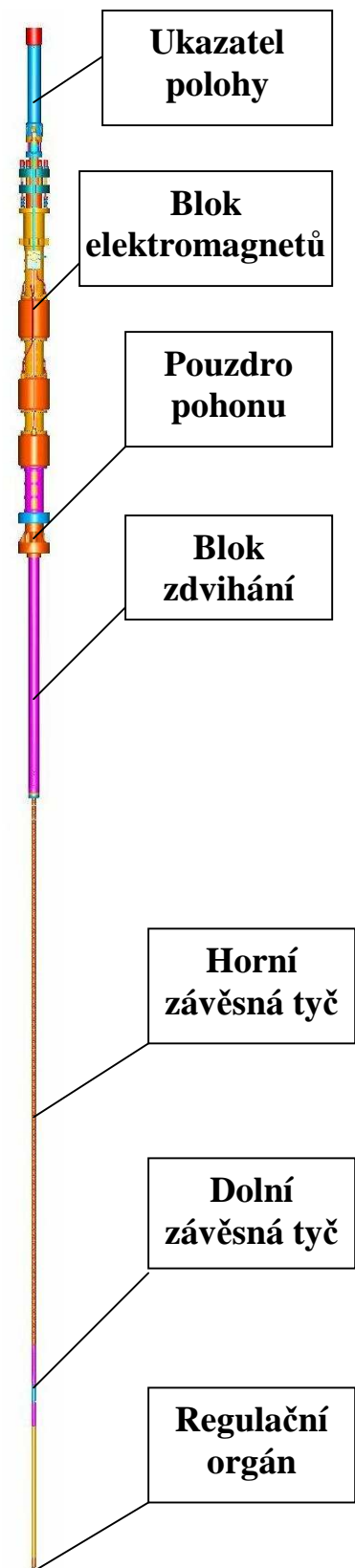


Obr 1. Horní část reaktoru VVER 1000

2. Popis zařízení

Pohon LKP-M/3 je složen z pěti základních částí (obr. 2 a 3):

1. **Pouzdro pohonu** tvoří tlakovou bariéru mezi primárním okruhem a prostorem nad víkem reaktoru. Je tvořeno trubkovým tělesem délky přibližně 2,9 m. Nese ostatní součásti pohonu. V dolní části je příruba, kterou je PP připevněno šesti předepnutými šrouby na nátrubek víka reaktoru.
2. **Blok elektromagnetů** je shora nasunut na pouzdro pohonu. Jeho dolní konec je opřen o zesílenou část pouzdra pohonu nacházející se nad dolní přírubou a v horní části je pružinami přitlačován proti táto opoře. Skládá se z tažného, záchytného a přídržného elektromagnetu. Magnety svým magnetickým polem ovládají kotvy, které zajišťují funkci mechanismů bloku zdvihání a tím i pohyb závěsné tyče. Blok elektromagnetů je složen z těles elektromagnetů propojených trubkovými tělesy rozdílných tloušťek.



Obr. 2. LKP-M/3

3. **Blok zdvihání** je umístěn uvnitř pouzdra pohonu a zabezpečuje přímočarý reverzibilní pohyb závěsné tyče s regulačním orgánem, jejich havarijní pád, stání závěsné tyče s regulačním orgánem a zabraňuje samovolnému vysouvání závěsné tyče s regulačním orgánem při poruše těsnosti pouzdra pohonu. Je složen z tažného a přídržného bloku (obr. 3). Hlavní části tažného bloku jsou tažná kotva, záchytná kotva, nosič záchytných západek a tlumič tažné kotvy s narážkou. Hlavní části přídržného bloku jsou přídržná kotva s nosičem přídržných západek. Nosič záchytných západek je trubkovým táhlem ovládán tažnou kotvou, která zajišťuje zdvižení nebo spuštění závěsné tyče o jeden krok délky 20 mm. Západky zavírá nebo otvírá pouzdro spojené trubkovým táhlem se záchytnou kotvou. Zdvížení tažné kotvy je po 10 mm tlumeno pružinovým tlumičem s narážkou a po dalších 10 mm je zdvih omezen dorazem. Přídržné západky umístěné v nosiči jsou ovládány pouzdem spojeným trubkovým táhlem s přídržnou kotvou. Blok zdvihání je pružinovým závěsem v horní části a pružinou v dolní části upevněn k pouzdrům pohonu. Blok zdvihání tvoří trubková tělesa různé tloušťky stěny. Celková délka bloku zdvihání je asi 4,5 m.
4. **Závěsná tyč** tvoří vazbu mezi regulačním orgánem a západkami bloku zdvihání. Závěsná tyč je rozdělena na horní a dolní část. Horní závěsná tyč je opatřena osazeními s roztečí rovnou délce kroku (20 mm). Dolní závěsná tyč je na dolním konci opatřena bajonetovým závěsem pro připojení regulačního orgánu. V dolní části je umístěn i čtyřhranný pojišťovací trn proti rozpojení bajonetu. Mezi horní a dolní závěsnou tyčí je pružné uložení. Horní část závěsné tyče tvoří válcové těleso s osazeními, zbytek tyče tvoří trubková a válcová tělesa.
5. **Ukazatel polohy** (UP-3) indikuje polohu závěsné tyče s regulačním orgánem. Je tvořen trubkovými a válcovými tělesy. Prochází blokem zdvihání a celou horní závěsnou tyčí.

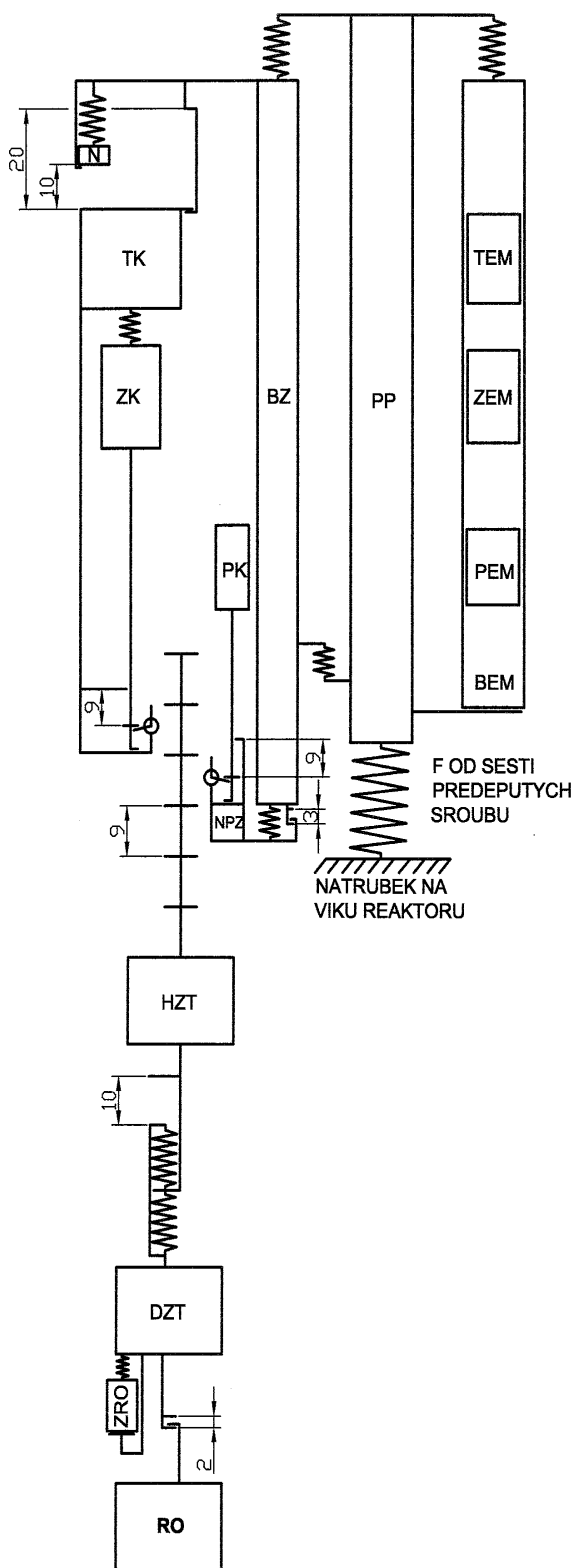
3. Princip činnosti pohonu

Pohyb závěsné tyče s regulačním orgánem, je obstaráván blokem zdvihání prostřednictvím tažného a přídržného bloku pomocí koordinovaného spínání a vypínání proudu do tažného, přídržného a záchytného elektromagnetu v bloku elektromagnetů. V průběhu jednoho kroku zdvihu nebo spuštění působí na tažnou, záchytnou a přídržnou kotvu magnetické pole různé intenzity dané velikostí proudu procházejícího elektromagnety (obr. 4 a 5). Kotvy ovládají trubkovými táhly nosiče západek a pouzdra na zavírání západek.

Postupným zavíráním, otvíráním a osovým posunem systému západek se dosáhne krokového reverzibilního pohybu závěsné tyče s regulačním orgánem. Krok vzhůru i dolů trvá přibližně 1 s. Činnost pohonu je možno nejlépe sledovat na jeho kinematickém schématu (obr.3).

Popis zdvihu:

1. Ve výchozím stavu visí závěsná tyč na záchytných západkách uzavřených pouzdem, které je spojeno se záchytnou kotvou. Záchytný elektromagnet je napájen proudem 6 A (obr. 4).
2. Zvýší se proud do záchytného elektromagnetu na 10 A.
3. Je vybuzen tažný elektromagnet proudem 14 A. Tažná kotva zvedne závěsnou tyč o jeden krok (20 mm) – omezeno dorazem (nosič záchytných západek je součástí tažné kotvy).
4. Vybudí se přídržný elektromagnet (9 A). Pouzdro spojené s přídržnou kotvou po 9 mm zdvihu zavře přídržné západky v odlehčeném stavu. Po dalších 1,5 mm převezmou přídržné západky závěsnou tyč a zdvih pokračuje ještě 1,5 mm. Tím dojde k odlehčení záchytných západek. Celkový zdvih přídržné kotvy je 12 mm (omezeno dorazem).



Obr. 3. Kinematické schéma

5. Ve dvou etapách je odbuzen záchytný elektromagnet. Nejdříve je snížen proud na 6 A, poté je zcela vypnut. Záchytná kotva odpadne, a tím se otevřou záchytné západky.

6. Ve dvou etapách je odbuzen tažný elektromagnet (9 A a 0 A) a tažná kotva se záchytnými západkami padá o 20 mm do výchozí polohy. Pád je bržděn krátkým zapnutím proudu v tažném magnetu (6 A).

7. Je opět nabuzen záchytný elektromagnet (10 A). Záchytné západky se zavřou v odlehčeném stavu.

8. Je odbuzen přídržný elektromagnet (0 A) čímž dojde k otevření přídržných západek a volnému pádu tyče o 1,5 mm na zavřené záchytné západky.

9. V záchytném elektromagnetu je snížen proud na 6 A, je obnoven výchozí stav.

Popis spouštění:

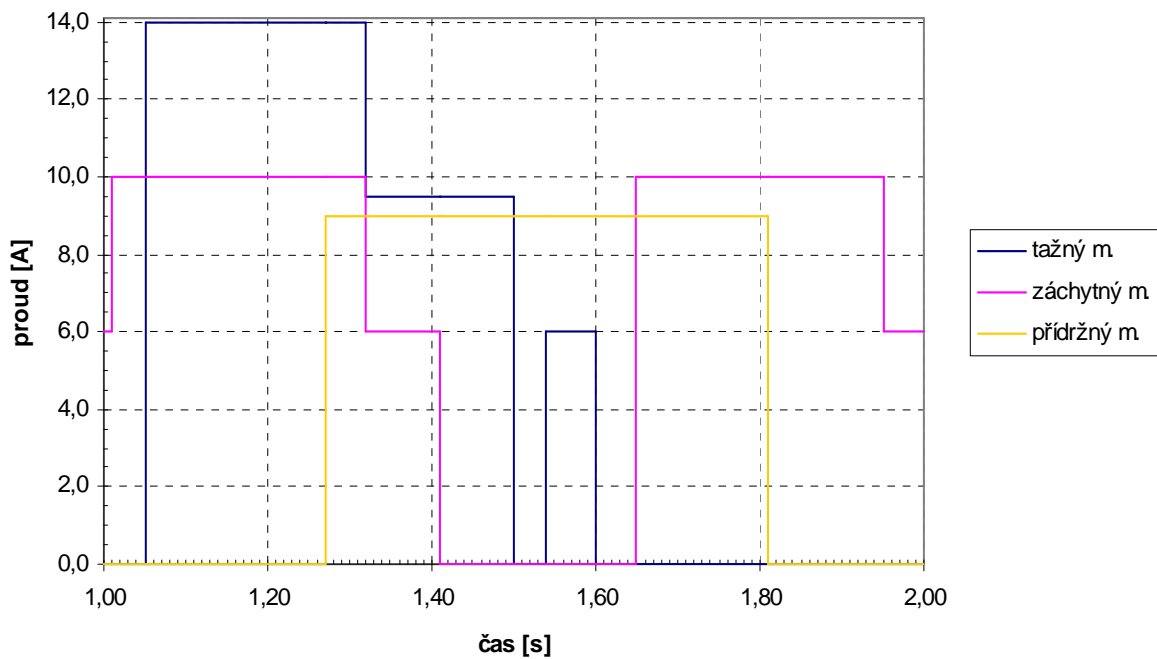
1. Ve výchozím stavu je závěsná tyč zavěšena na záchytných západkách uzavřených pouzdem, které je spojeno se záchytnou kotvou. Záchytný elektromagnet je napájen proudem 6 A (obr. 5).

2. Vybudí se přídržný elektromagnet (9 A). Pouzdro spojené s přídržnou kotvou po 9 mm zdvihu zavře přídržné západky v odlehčeném stavu. Po dalších 1,5 mm převezmou přídržné západky závěsnou tyč a zdvih pokračuje ještě 1,5 mm. Tím dojde k odlehčení záchytných západek. Celkový zdvih přídržné kotvy je 12 mm (omezeno dorazem).

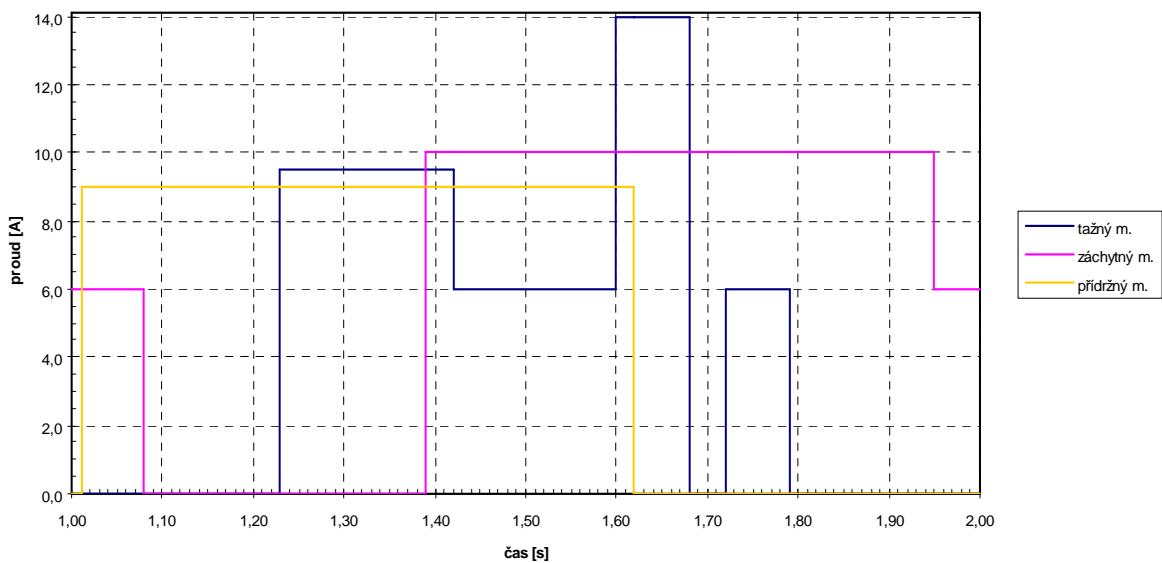
3. Je vypnut proud v záchytný elektromagnet. Záchytná kotva odpadne a tím se otevřou záchytné západky.

4. Je vybuděn tažný elektromagnet proudem 9,5 A. Tažná kotva se zvedne spolu se záchytnou kotvou a nosičem záchytných západek o 20 mm – omezeno dorazem.

5. Vybudí se záchytný elektromagnet (10 A). Pouzdro spojené se záchytnou kotvou uzavře záchytné západky v odlehčeném stavu.



Obr. 4. Sled zapínání a vypínání proudů do cívek elektromagnetů - krok zdvihu



Obr. 5. Sled zapínání a vypínání proudů do cívek elektromagnetů - krok spouštění

6. Proud v tažném magnetu je snížen na 6 A.

7. Proud v tažném magnetu je zvýšen na 14 A.

8. Je vypnut proud v přídržném elektromagnetu. Odpadnutím přídržné kotvy se otevřou přídržné západky a závěsná tyč padá o 1,5 mm na zavřené záchytné západky.

9. Je odbuzen tažný magnet. Tažná kotva spolu se záchytnou kotvou a závěsnou tyčí padají o 20 mm dolů do výchozí polohy. Pád je bržděn krátkým zapnutím proudu v tažném magnetu (6 A).

10. V záchytném magnetu je snížen proud na 6 A, je obnoven výchozí stav.

4. Výpočtový model

Při tvorbě modelu jsme navázali na práci [1]. Hlavní pokrok spočívá v možnosti využít CAD model LKP-M/3, který je ve ŠKODA JS v současné době k dispozici. V době, kdy byl tvořen výpočtový model LKP-M/2 popsany ve zprávě [1], byly k dispozici pouze ručně kreslené výkresy. Při tomto postupu bylo možno provádět kontroly pouze vizuálně a geometrická přesnost modelu byla více ovlivněna lidským faktorem. To současný postup vylučuje, protože v průběhu tvorby geometrie modelu byly délky a rozměry jednotlivých částí přímo odečítány z CAD modelu, ze kterého byly vygenerovány výrobní výkresy a podle kterých byl vyroben prototyp pohonu.. Současně byly prováděny součtové kontroly délek jednotlivých částí a vypočtené hodnoty byly porovnávány s odpovídajícími délkami odměřenými v CAD modelu. Hmotnosti jednotlivých částí byly též porovnány s hmotnostmi odečtenými z CAD modelu.

Dynamická analýza má za cíl zjistit chování pohonu během jeho normálního provozu a určit výchylky, rychlosti, zrychlení a namáhání od dynamických sil jednotlivých členů pohonu. Budící síly mají teoreticky pouze svislý směr. Model byl však vytvořen obecněji ve 3D prostoru, aby byl v případě potřeby snadno použitelný i pro výpočty uvažující jiná zatížení (např. seizmická). V této zprávě jsou globální souřadnice x a z všech uzlů rovny nule, s výjimkou uzlů pomocných, které je v použitém programovém souboru [2] nutno zadat i pro osově symetrické průřezy nosíkových prvků. V důsledku upevnění popsaného dále a směru buzení jsou i výsledné hodnoty výchylek, rychlostí a zrychlení nenulové pouze ve směru globální osy y.

Výpočtový model pro metodu konečných prvků (MKP) byl vytvořen v programovém souboru [2]. Pro modelování byly použity prvky, uvedené v tabulce 1.

Modelování kluzných vedení částí modelů vůči sobě, svázání posuvů některých dílů a kotvení pružin je provedeno pomocí příkazů COUPLING.

Konstrukce pohonu LKP-M/3 je převážně rotačně symetrická kolem svislé osy.

Tab. 1. Prvky použité ve výpočtovém modelu

TYP PRVKU	POUŽITÍ
BEAM 3D	Modelování vnějších i vnitřních objemových částí pohonu.
LINEÁRNÍ 3D PRUŽINA	Modelování pružných dorazů a pružných uložení částí pohonu.
MASS	Dodání chybějících hmotností, náhrada tuhých částí.
NELINEÁRNÍ 3D PRUŽINA	Modelování silových interakcí mezi póly a kotvami v BZ, na které působí magnetické pole z magnetů v bloku elektromagnetů.

4.1 Předpoklady pro tvorbu modelu

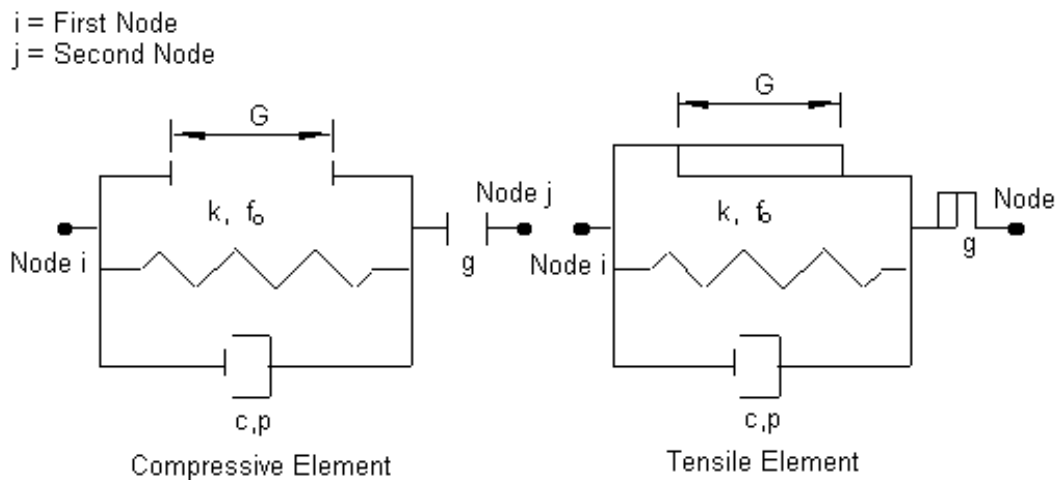
1. Rotačně symetrický model.
2. Příruba na víku reaktoru je uvažována jako tuhý základ.
3. Chladicí kapalina uvnitř pouzdra pohonu a bloku je uvažována pouze statickou hmotností.
4. Není uvažováno tření (prakticky všechny třecí plochy jsou „mazány“ chladicí kapalinou a pohybující se části jsou ještě vedeny plastovými kroužky).
5. Zámek regulačního orgánu byl z důvodu velmi malé hmotnosti vůči okolním hmotnostem zahrnut do dolní závěsné tyče. Přítlačná pružina byla vypuštěna.

6. Ukazatel polohy UP3 je pevně spojen šrouby s pouzdem pohonu. Proto i v modelu tvoří tyto části jeden celek.

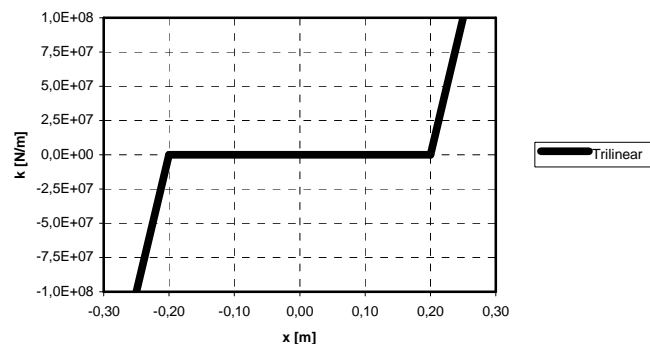
4.2 Geometrické nelinearity

Nelinearity jsou ve výpočtovém modelu LKP-M/3 geometrického typu (dorazy) a silové (působení elektromagnetů na kotvy).

Dorazy jsou jednostranné a oboustranné a některé jsou kombinovány s pružinami (horní pružinový závěs bloku zdvihání na pouzdro pohonu, pružné uložení mezi dolní a horní závěsnou tyčí). Oboustranné dorazy je možno modelovat buď dvěma prvky modelujícími kontakt - GAP, nebo s použitím prvku pro nelineární pružiny - NONLINEAR SPRING s dvěma uzly (tzv. trilineární pružina). Schema tlačného a tažného prvku GAP je uvedeno na obr. 6 a trilineární charakteristika použitá k modelování oboustranného dorazu pomocí elementu NONLINEAR SPRING je zobrazena na obr. 7.



Obr. 6. Schema tlačného a tažného dvouuzlového GAP prvku



Obr. 7. Trilineární charakteristika pro modelování oboustranného dorazu 0,2 m

4.3 Použité materiály

Všechny hlavní části LKP -M/3 jsou vyrobeny ze stabilizované austenitické nerez oceli 08CH18N10T. Materiálové vlastnosti pro tuto ocel v závislosti na teplotě jsou v tab. 2.

Tab. 2. Materiálové vlastnosti oceli 08CH18N10T v závislosti na teplotě

Teplota [°C]	20,0	100,0	200,0	300,0	350,0
E [Pa]	$2,05 \cdot 10^{11}$	$2,00 \cdot 10^{11}$	$1,90 \cdot 10^{11}$	$1,80 \cdot 10^{11}$	$1,75 \cdot 10^{11}$
α [K ⁻¹]	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$1,76 \cdot 10^{-5}$
ν [-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
ρ [kg.m ⁻³]	7900	7900	7900	7900	7900
Z [%]	40	40	40	40	40
R _{p0,2} [MPa]	196	186	177	167	157
R _m [MPa]	491	461	422	392	353

4.4. Síly

Síly působící na konstrukci jsou objemové, tj. působící v celém objemu konstrukce (gravitace) a soustředěné, působící v jednotlivých uzlech. Tíha, způsobená gravitačním polem naší planety je zadána gravitačním zrychlením $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. To působí v záporném směru globální osy y výpočtového modelu.

Soustředěné síly jsou jednak síly stálé (předpětí pružin) a jednak proměnné. Proměnné síly jsou v tomto případě buď lineárně závislé na vzájemném posuvu dvou částí pohonu (stlačení pružin) nebo nelineárně závislé na vzdálenosti kotvy od příslušného protipólu elektromagnetu (přitahování kotev elektromagnetů).

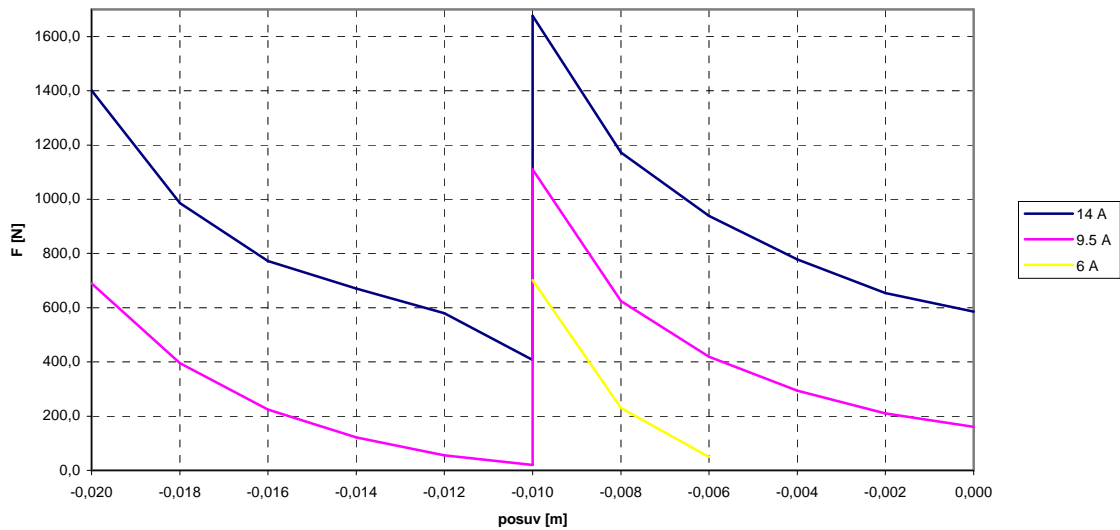
Síly nelineárně závislé na vzájemném posuvu dvou uzlů nelze v programovém souboru COSMOS/M zadat přímo. Zvolili jsme proto postup, kdy jsme zadali do příslušných uzlů konstantní přitažné síly a zároveň jsme tyto uzly propojili dvouuzlovým nelineárním prvkem (NONLINEAR SPRING) jehož charakteristika je inverzní k tzv. statické charakteristice elektromagnetu. Ta je měřena na zkušebně a určuje přitažnou sílu v závislosti na posuvu kotvy. V průběhu kroku zdvihu nebo spouštění jsou jednotlivé magnety buzeny různě vysokými proudy. Proto pro každý magnet máme dvě až tři statické charakteristiky.

Příklad jednoho záznamu těchto charakteristik pro tažný magnet je vykreslen na obr. 8. Pro posuv kotvy 10 mm dojde ke skokovému snížení přitažné síly, protože se tažná kotva opře o nárazku tlumiče. K tomu dojde pouze pro budící proudy 9,5 a 14 A, budící proud 6 A slouží pouze k brždění pádu závěsné tyče s klastrem.

Postup zpracování naměřených statických charakteristik tažného elektromagnetu je uveden na obr. 9. Nejprve byly naměřené statické charakteristiky nahrazeny polynomy 3. a 2. stupně a podrobněji rozděleny. Poté byly hodnoty v jednotlivých bodech křivek statických charakteristik odečteny od příslušných konstantních sil. Tak jsme získali hodnoty tuhostí nelineárních pružin pro jednotlivé proudy elektromagnetu v závislosti na posuvu kotvy. Při výpočtu působí konstantní síly ve směru přitahování a od nich se odečítají proměnlivé síly tuhosti pružin. Výsledná síla je v každém okamžiku rovna síle podle statické charakteristiky elektromagnetu.

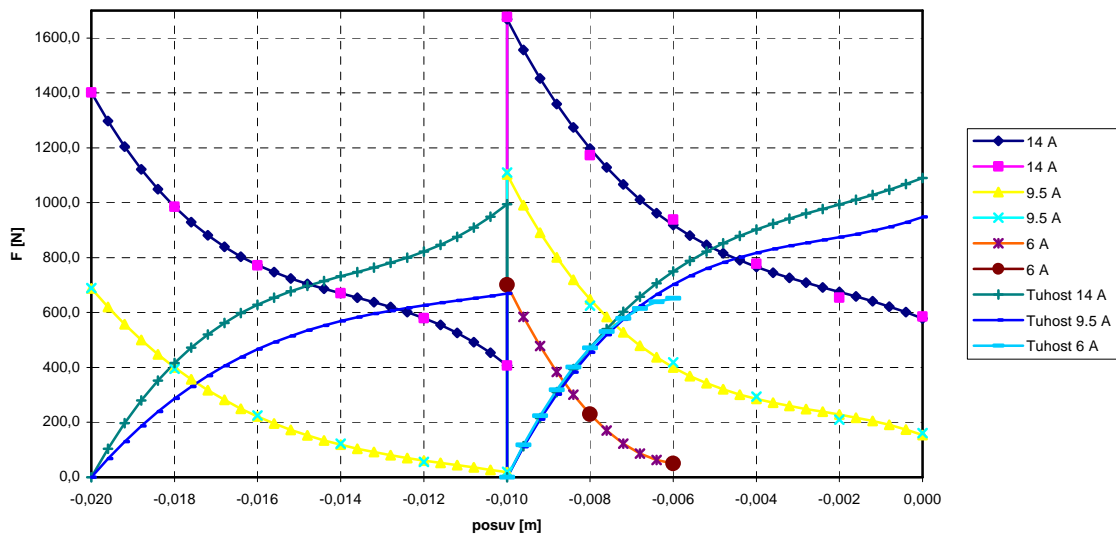
Pro záchytný a přídržný magnet je postup obdobný, pouze průběhy naměřených statických charakteristik nemění skokově sílu během přitahování.

Statické charakteristiky tažného magnetu



Obr. 8. Statické charakteristiky tažného magnetu

Úprava statických charakteristik - tažný magnet



Obr. 9. Převod statických charakteristik TEM na charakteristiky nelineárních pružin

4.5. Hmotnosti

Výpočtový model byl sestaven na základě údajů převzatých z 3D modelu vytvořeného v CAD systému I-DEAS [6]. Délkové a průřezové charakteristiky se přesně shodují. Rozdíly jsou však v detailech, které nemůže výpočtový model určený pro dynamický výpočet zahrnout (šroubová spojení, osazení, zápichy, otvory ve stěnách apod.). Největší rozdíl v hmotnosti modelu oproti skutečnosti je u pouzdra pohonu (3,08 %).

Hmotnost klastru je 17 kg. Klastr je v tomto výpočtovém modelu nahrazen jediným elementem typu BEAM3D.

5. Výpočty

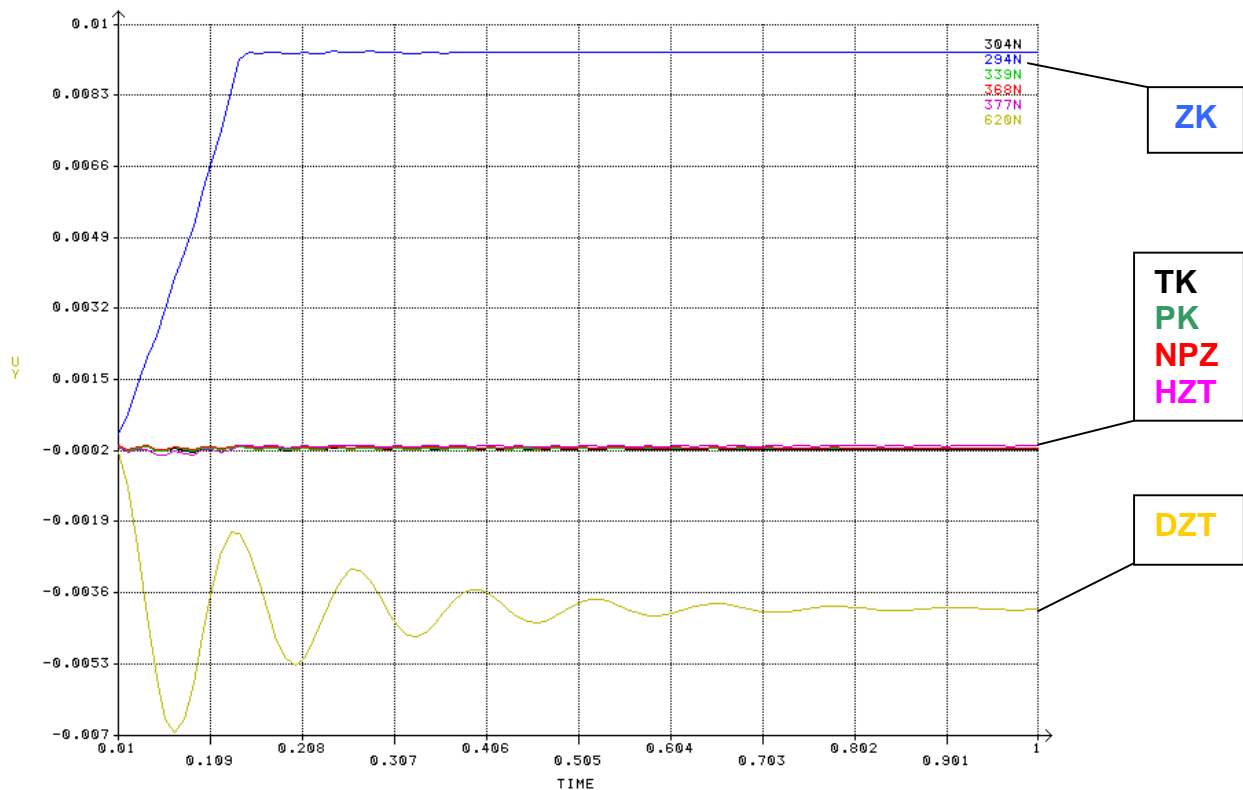
Pro výpočty je použita metoda přímé integrace pohybové rovnice, která je v programu COSMOS/M použita v řešiči modulu NSTAR. Tento řešič umožňuje zahrnout do výpočtu všechny druhy nelinearit, které výpočtový model obsahuje.

5.1. Přípravná fáze

Nejdříve bylo počítáno ustálení pohybu vzniklého náhlým počátkem působení gravitačního zrychlení a přitažením kotvy záchytného magnetu do výchozí polohy. Poté se začnou měnit proudy v jednotlivých magnetech podle příslušného diagramu (obr. 4 pro zdvih, obr. 5 pro spouštění). Pro toto ustálení jsme zvolili dobu jedné vteřiny.

Na obr. 10 je uveden pohyb hlavních částí LKP-M/3 během přípravné fáze výpočtu. V této fázi kmitá dolní závěsná tyč s regulačním orgánem vlivem náhlého počátku působení gravitačního zrychlení. Ostatní části vibrují minimálně.

Záchytná kotva vyjede o 9 mm vlivem zapojení záchytného magnetu napájeného proudem 6 A až k dorazu na tažnou kotvu a zavře tak záchytné západky. Po nárazu v horní poloze se též trochu rozkmitá. Na konci přípravné fáze je celý model prakticky v klidu a může být simulován zdvih nebo spouštění regulačního orgánu.



Obr. 10. Posuv [m] hlavních částí LKP-M/3 během přípravné fáze výpočtu

Krok zdvihu nebo spouštění je možno počítat po proběhnutí tohoto přípravného kroku, nebo je možné ho navázat na právě spočtený krok zdvihu nebo spouštění.

5.2. Zdvih

Jeden krok zdvihu nebo spouštění LKP-M/3 trvá 1 s. Rozdělili jsme je na 12 časových úseků. Každý z nich se od ostatních odlišuje v zadání silových křivek, počátečních podmínek

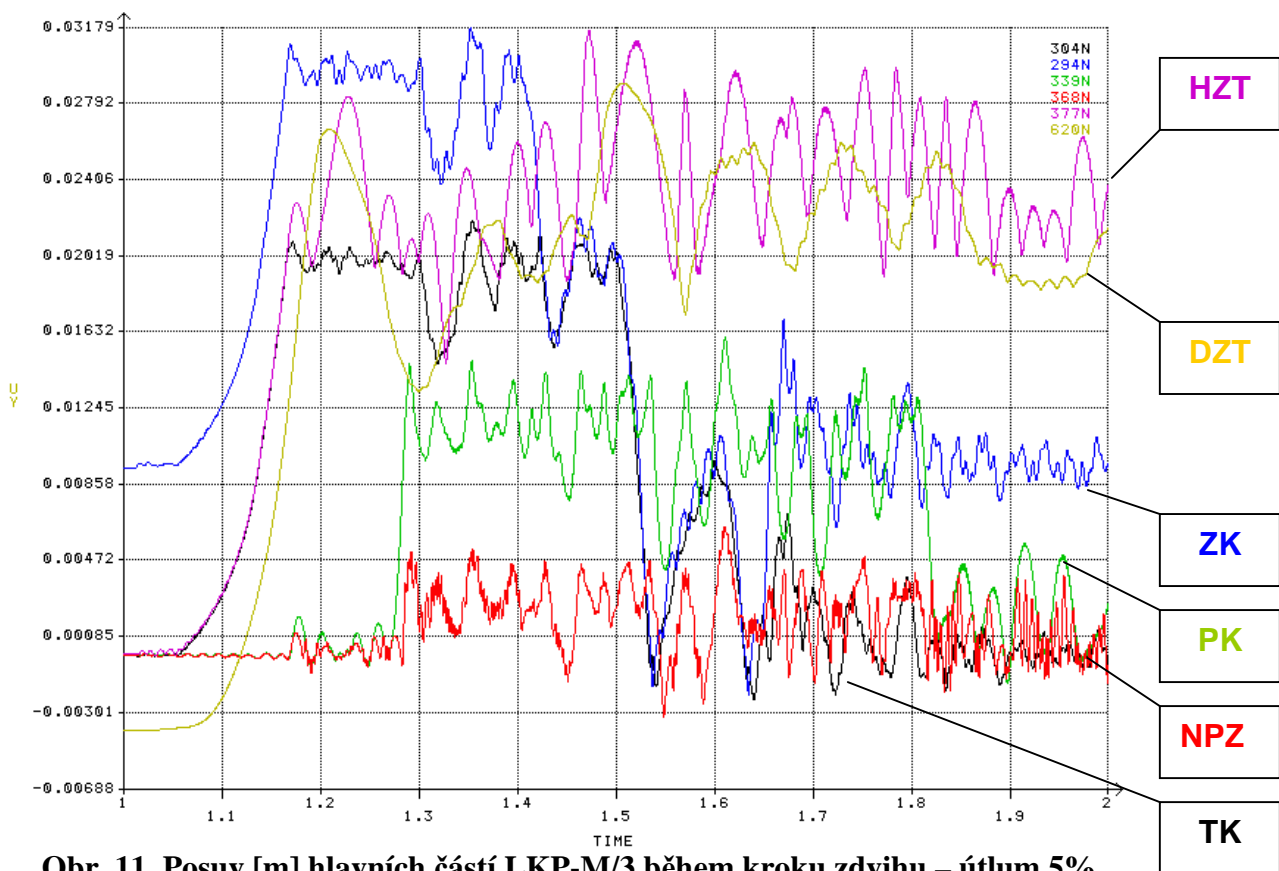
a konstant určujících vlastnosti elementů NONLINEAR SPRING, kterými je v průběhu zdvihu a spouštění upevněna horní závěsná tyč střídavě k nosiči záchytných západek a k nosiči přídržných západek.

Silové křivky spolu s konstantními silami reprezentují zadání proměnlivých sil elektromagnetů na kotvy a protipóly, v závislosti na procházejícím proudu a vzdálenosti kotvy od příslušného protipólu magnetu (viz kap. 3.5).

Počáteční podmínky jsou na počátku zdvihu dány vektory deformací, rychlostí a zrychlení na konci přípravné fáze a v každém dalším časovém úseku jsou rovny těmto vektorům vypočteným pro konec předchozího úseku.

Délka jednotlivých časových úseků a použité silové křivky jsou určeny podle diagramu znázorňujícího sled zapínání a vypínání elektromagnetů zobrazeného na obr. 4.

Na obr. 11 je uveden pohyb hlavních částí LKP-M/3 během kroku zdvihu.

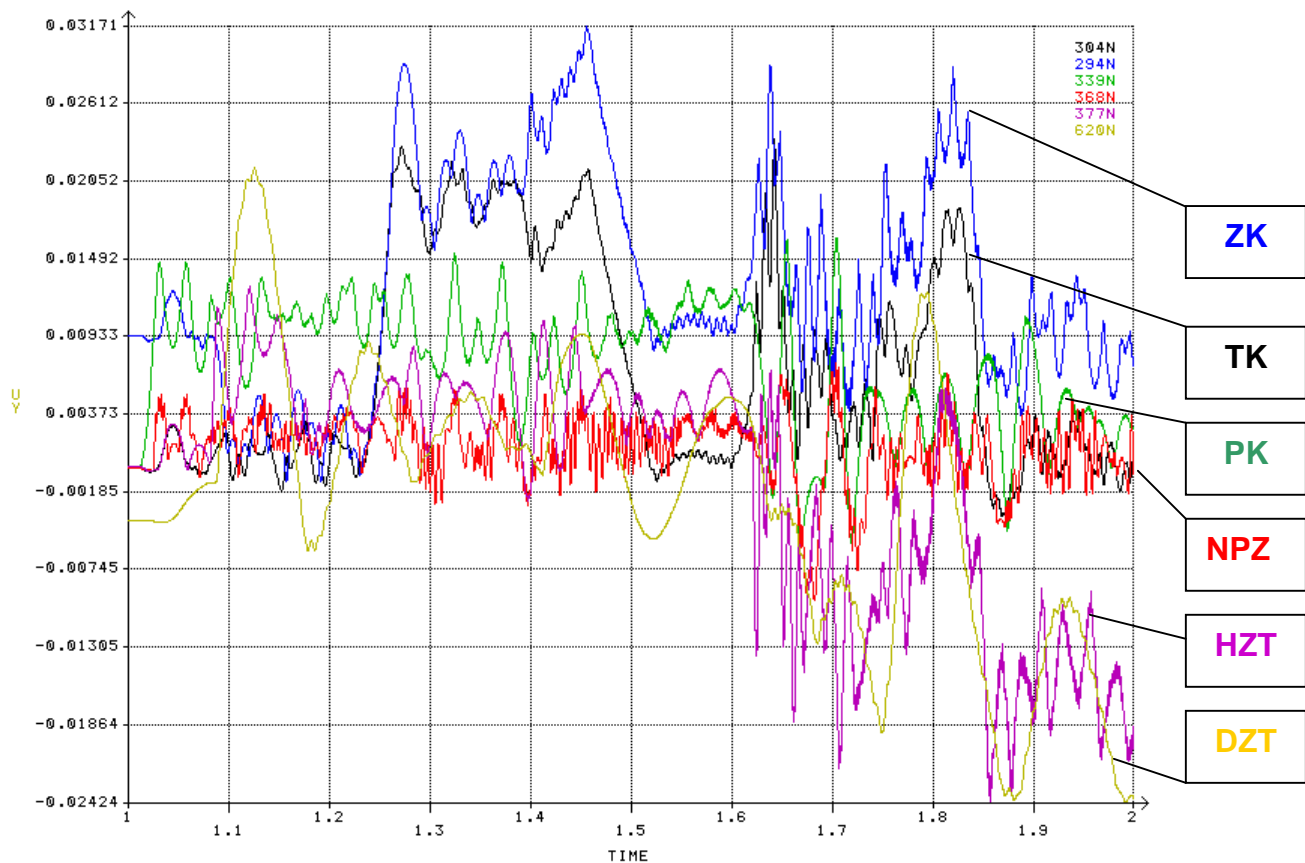


Obr. 11. Posuv [m] hlavních částí LKP-M/3 během kroku zdvihu – útlum 5%

5.3. Spouštění

Délka jednotlivých časových úseků a použité silové křivky jsou určeny podle diagramu znázorňujícího sled zapínání a vypínání elektromagnetů zobrazeného na obr. 5.

Na obr. 12 je uveden pohyb hlavních částí počítaného pohonu během kroku spouštění při útlumu 5%.



Obr. 12. Posuv [m] hlavních částí LKP-M/3 během kroku spouštění – útlum 5%

6. Závěr

V tomto příspěvku byl popsán výpočtový model modernizovaného lineárního krokového pohonu řídicí tyče jaderného reaktoru VVER 1000. Dále jsou zde uvedeny průběhy pohybu jeho hlavních částí při přípravné fázi, zdvihu a spouštění klastru o jeden krok.

Dále byly spočteny varianty pro různé útlumy, byly vykresleny průběhy rychlosti a zrychlení ve zvolených místech konstrukce. Pro útlum 20 % byla zjištěna největší hodnota výsledné napjatosti při kroku spouštění.

7. Literatura

- [1] Markov P., Svoboda V., Dynamický model LKP-M/3 a výpočet vibrací při jeho chodu. Zpráva ŠKODA JS a.s., Plzeň 2006.
- [2] Manuál systému COSMOS/M v. 2.9.
- [3] Brejcha, Dolejší, Janouš, Měření statických silových charakteristik LKP-M/3, měření ŠKODA JS a.s. ZK-P/003/05, Plzeň 2005.
- [4] Doležel I., Ulrych B., Optimalizace přídržného elektromagnetu LKP-M/3, II. etapa - doplňující výpočty. Výzkumná zpráva ZČU Plzeň, NTC 02-11/03, Plzeň 2003.
- [5] Vostracký Z., Doležel I., Ulrych B., Statická charakteristika záchytného elektromagnetu pro pohonný mechanismus LKP-M/3 a možnosti jejího ovlivnění. Výzkumná zpráva ZČU Plzeň, NTC 02-14/01, Plzeň 2001.
- [6] 3D CAD systém I-DEAS v. 11.