

# Metoda Model-Based Design pro vývoj elektropohonů a elektromobilitu

Metoda *Model-Based Design* představuje moderní přístup při vývoji (nejen) elektrických zařízení. Opírá se o simulační modely fyzických komponent, jako jsou elektrický pohon, baterie, výkonová elektronika a další mechanické, elektrické či kapalinnové části zařízení. Na základě modelů lze vyvíjet pokročilý řídicí a obslužný software jako již nedílnou součást většiny technických zařízení. Software lze podrobně ověřit a poté cestou automatického generování zdrojového kódu přetvořit do podoby vhodné pro cílovou platformu.

## Co je metoda Model-Based Design

Základem metody *Model-Based Design* (MBD) je systematické využívání simulačních modelů napříč vývojovým procesem. Simulace s virtuálním modelem umožňují rychle získat vzhled do chování uvažovaného zařízení v reálném světě, provádět virtuální ověřování různých scénářů a ověřovat funkčnost vestavěného softwaru. Využití modelů pomáhá urychlit posuzování variant, bezpečně studovat mezní případy a zlepšit celkovou kvalitu vyvíjeného zařízení.

Přínosy MBD jsou zejména:

- efektivita vývoje, ověřování a implementace řídicích algoritmů,
- optimalizace návrhu a analýza možností pomocí simulací,
- ověření splnitelnosti požadavků v raných fázích vývoje,
- generování kódu pro stavbu prototypu i výrobu (mikroprocesory, FPGA i SoC),

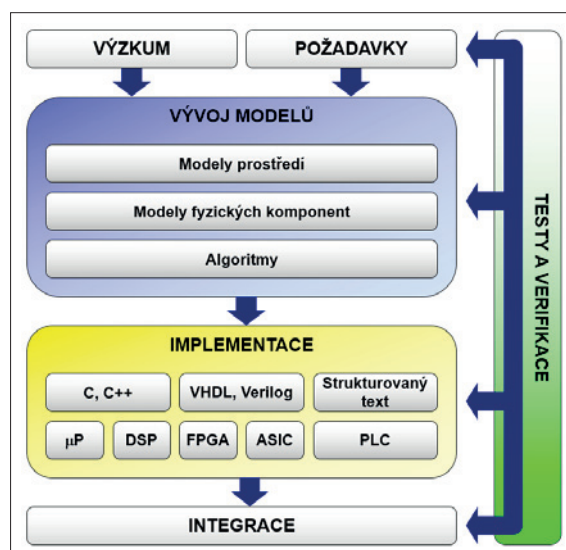
- možnost analyzovat údaje z provozu zařízení včetně konceptu „digitální dvojče“,
- vývoj podle standardů jako např. Autosar, Aspice, ISO 26262, EN 50128 a MISRA-C.

Článek se blíže věnuje jednotlivým dílčím aspektům vývoje při použití metody MBD podle obr. 1, a to v prostředí elektrických pohonů a elektromobility. Jako o nástroj vhodný k práci podle metody MBD se přitom opírá o osvědčená vývojová prostředí Matlab a Simulink.

## Modelování zařízení

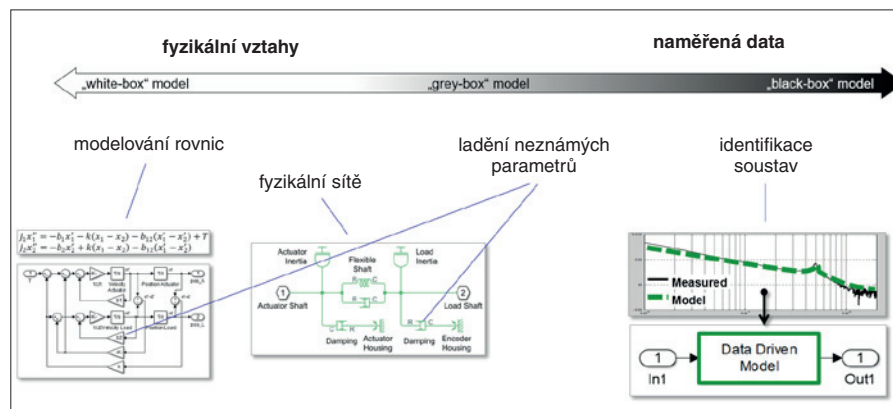
Prvním krokem obvykle řešeným při použití metody MBD je namodelování zařízení (fyzické soustavy). K tomu existují dva základní přístupy: modelování s použitím fyzikálních vztahů anebo identifikace modelu z hodnot naměřených přímo na reálném zařízení. Každý z obou přístupů má své přednosti a lze je vzájemně kombinovat. Model

založený na fyzikálních principech je možné vytvořit, aniž by bylo fyzické zařízení k dispozici, takže se uplatní i v raných etapách vývoje. Předností modelu založeného na údajích z reálného zařízení je relativní snadnost jeho



Obr. 1. Postup vývoje při použití metody Model-Based Design

získání a skutečnost, že tento přímo odráží chování zařízení, které má uživatel „v ruce“. V prostředí Matlab a Simulink se modely vytvářejí v grafické podobě blokových schémat (obr. 2).



Obr. 2. Přístupy k vytváření simulačního modelu v prostředí Simulink

## Vývoj algoritmů

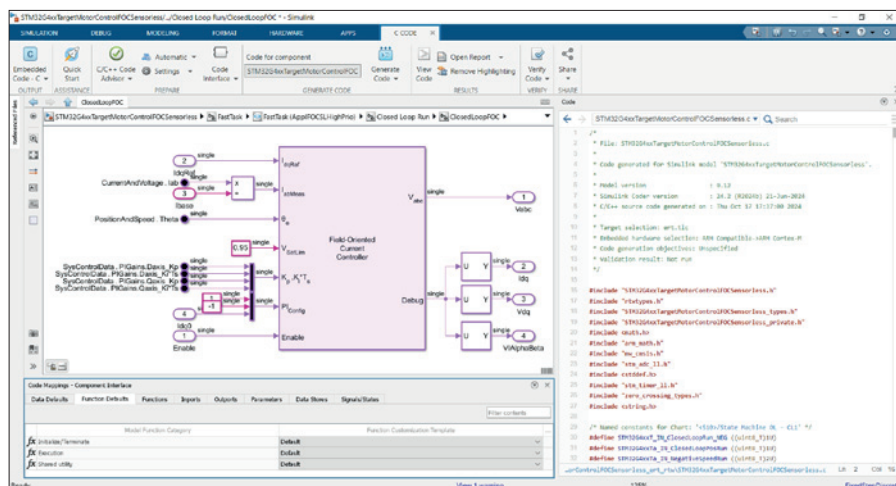
Na modely fyzikálních soustav navazuje návrh, vývoj a ověřování softwarových algoritmů. Obvykle jde o řídicí algoritmy, algoritmy pro úpravu a zpracování měřených signálů, popř. analýzu obrazu apod. Cílem je výsledný algoritmus provozovatelný ve spojení s reálným zařízením, a to ve formě programu vestavěného do určité cílové platformy (mikroprocesor, FPGA, SoC apod.).

Vývoj vestavěného softwaru sestává ze dvou kroků. Prvním je vytvořit a ověřit algoritmus ve formě jeho simulačního modelu. Ten lze propojit s modelem soustavy a tak ověřovat chování algoritmu, aniž by bylo ohroženo reálné zařízení.

Druhým krokem je vygenerování zdrojového kódu pro zvolenou cílovou platformu. Tato činnost je zcela automatizovaná. V podstatě jde o převod funkcí algoritmu z modelovacího prostředí do podoby programu v cílovém jazyce (C/C++, VHDL apod.) určeném k zavedení do konkrétního hardwaru (obr. 3).

## Verifikace a testování

Hlavním přínosem metody MBD je možnost průběžně, pomocí simulací, ověřovat funkceschopnost libovolného návrhu. Lze ověřovat, zda navržené řešení odpovídá zadaným požadavkům, zda algoritmus funguje i pro krajní případy chování soustavy či zda cílový zdrojový program splňuje závazné standardy. Ověřování navíc může probíhat i v reálném čase, kdy je simulovaný algoritmus propojen s reálnou soustavou, nebo naopak, kdy simulační model soustavy je propojen s reálným elektronickým zařízením obsahujícím vestavěný software.



Obr. 3. Příklad modelu vektorového řízení pohonu (Field Oriented Control – FOC) a vygenerovaný kód v jazyku C (prostředí Simulink)

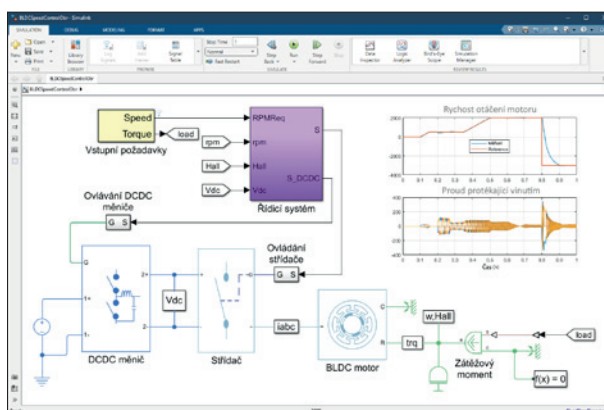
### Návrh elektrických pohonných systémů

V oboru elektrických pohonů a elektromobility se metoda MBD uplatňuje zejména v těchto oblastech:

- *elektrické pohony*: modelování a simulace pohonů na systémové úrovni,
- *řídící systémy*: vývoj řídicích systémů pro elektrické pohony,
- *baterie a BMS*: modelování baterií a jejich sestav a vývoj systémů pro jejich správu (Battery Management System – BMS),
- *umělá inteligence (Artificial Intelligence – AI)*: využití strojového učení v oboru elektrických pohonů,
- *real-time testing*: ověřování s použitím simulace v reálném čase.

### Vývoj elektrického pohonu

Typické kroky při vývoji elektrického pohonu metodou MBD zahrnují modelová-



Obr. 4. Příklad modelu pohonu s motorem s elektronickou komutací (prostředí Simulink)

ní elektromotorů – synchronních (Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM), s elektronickou komutací (Brushless DC – BLDC) nebo indukčních – a dále modelování výkonové elektroniky (měnič napětí, střídač),

návrh a implementaci vestavěného softwaru (řídící algoritmy, virtuální senzory), vymezení testovacích scénářů a simulace a analýzy výsledků (obr. 4).

Modely jednotlivých komponent mohou mít různou úroveň detailů v závislosti na zadaných požadavcích. Například model polovodičového měniče napětí může mít podobu jednoduchého přepočtu vstupního napětí na výstupní (model ustáleného stavu), dynamické soustavy s přechodovými jevy (model s průměrovaným spínáním), modelu zahrnujícího idealizované spínání polovodičových prvků (po částech lineární model spínání) nebo modelu plně respektujícího nelineární průběh každého sepnutí každého z použitých polovodičových prvků, popř. včetně zahrnutí dalších parazitních jevů. Volba úrovně detailu závisí na účelu modelu. Zatímco pro vy-

hodnocení vlivu hodnot parametrů jednotlivých součástek na chování systému je třeba detailnější úroveň, pro návrh řídicího systému může postačovat model jednodušší.

Jako výsledek vývojového procesu je z navrhovaných algoritmů generován zdrojový kód (C/C++, HDL) integrovaný do reálného prostředí.

### Bateriové systémy a jejich správa

Metodu MBD lze využít také při navrhování sestav baterií. Je možné modelovat bateriové články, navrhovat různé architektury sestav baterií (battery pack) a sledovat tepelné a elektrické chování baterií za běžných a poruchových podmínek. K tomu lze využít parametrizova-

# MATLAB® & SIMULINK®

NOVÁ VERZE

# R2024b

ÚPRAVA TEXTOVÝCH STYLŮ V LIVE EDITORU

LIVE EDITOR TASK PRO INTERAKTIVNÍ ŘEŠENÍ SYSTÉMŮ

OBYČEJNÝCH DIFERENCIÁLNÍCH ROVIC

INTERFACE VIEW – NOVÝ NÁHLED NA MODEL V SIMULINKU

UŽYKOUŠEJTE NOVÝ DESKTOP PRO MATLAB (BETA) S ŘADOU DALŠÍCH NOVINEK

<https://www.humusoft.cz/matlab/new>

HUMUSOFT®

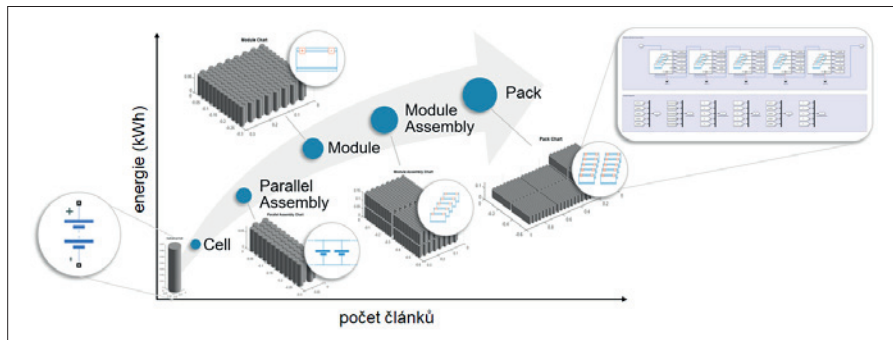
Humusoft s.r.o.  
Pobřežní 20, Praha 8

E-mail: [info@humusoft.cz](mailto:info@humusoft.cz)  
Tel: +420 284 011 730



né modely bateriových článků, sestavit vlastní model baterie se zahrnutím různých efektů, geometrií a topologií i doplnit jej chladicím systémem (obr. 5)

Účelem algoritmů po správu baterií (BMS) je zajistit požadovaný výkon, spolehlivý a bezpečný provoz a přijatelnou dobu provozního života baterie v různých provozních reži-



Obr. 5. Úrovně uspořádání sestavy baterií a odpovídající modely v prostředí Simulink

mech při měnících se okolních podmínkách. Simulací na úrovni systému lze ověřit funkční aspekty návrhu BMS, získat přehled o dynamickém chování baterie, ověřit efektivitu BMS a následně automaticky vygenerovat kód pro zavedení BMS do reálného zařízení. K typickým úkolům BMS patří sledování napětí a zahřívání článků, odhad stavu nabití a kondice baterie (*state-of-charge*, *state-of-health*), volba vhodného profilu nabíjení, vyvažování stavu nabití jednotlivých článků či řízení odpojení baterie od zdroje/zátěže v případě nutnosti.

## Využití AI

V oboru elektrických pohonů nachází své místo také AI, a to v oblastech:

- tvorby redukovaných modelů pro efektivnější simulace,
- virtuálních senzorů: získávání hodnot veličin, které nelze přímo měřit,
- řídicích systémů založených na AI: využití přístupu *reinforcement learning*,
- předpovídání spotřeby, dodávky a cen energií,
- prediktivní údržby: online diagnostika při provozu zařízení.

## Ověřování v reálném čase a elektromobilita

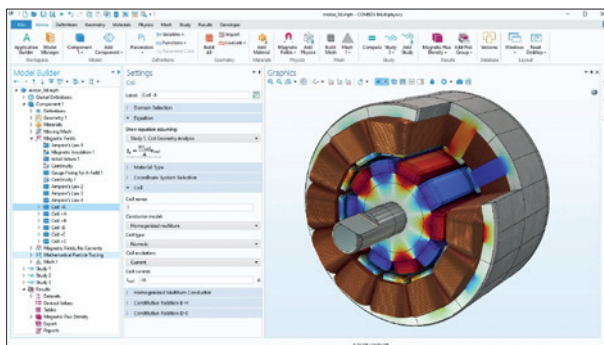
K ověřování v reálném čase se využívají specializovaná zařízení, tzv. real-time simulátory, v podstatě v návaznosti na ověřování modelů v počítači. Uplatňují se zejména tam, kde je nezbytné ověřit funkceschopnost vyvíjeného zařízení při působení všech přírodních vlivů, nejen jeho algoritmus.

S transformací automobilového průmyslu směrem k elektrickým a hybridním vozidlům je třeba souběžně jako celek řešit komunikaci vozidla s nabíjecí stanicí, systémy pro sprá-

vu baterie a elektrické pohony. Každou dílčí část je před zavedením do provozu nutné dokonale prověřit.

Pro simulace v reálném čase je třeba volit takové simulační modely, které dokážou běžet v reálném čase a zároveň mají dostatečný stupeň přesnosti. Vhodné modely optimalizované k chodu na real-time platformě,

od řízení motorů po simulaci baterie, nabízí např. platforma dSpace, zaměřená na technické prostředky pro simulace v reálném čase. Modely jsou otevřené a uživatel je může parametrizovat podle vlastního uvážení.



Obr. 6. Modelové zobrazení elektromotoru v prostředí Comsol Multiphysics

## Spojitě parametry soustav

Vedle simulací soustav se soustředěnými parametry je někdy nezbytné přejít do hlubšího detailu a použít modelování spojitě rozložených veličin na základě popisu soustav zpravidla parciálními diferenciálními rovnicemi. Takto se modelují např. procesy přenosu tepla, mechanická namáhání, proudění tekutin, elektromagnetické jevy či jejich kombinace. K realizaci takových modelů se využívá metoda konečných prvků (*Finite Element Method* – FEM), dostupná v softwarových nástrojích typu např. Comsol Multiphysics.

## Použití FEM při simulacích pro elektromobilitu

Simulace na bázi FEM se používají k detailnímu modelování součástí. Díky pokročilému simulačnímu softwaru Comsol Multiphysics lze využívat předpřipravené výpočetní

moduly k simulacím v oborech elektromagnetismu (elektromotor, ukládání energie, kabeláž), tepla a deformací, optiky (osvětlení), akustiky (šíření hluku), mechaniky (převodové mechanismy, pohyb rotačních částí), chemie a elektrochemie (baterie, palivové články).

Při omezení se pouze na baterii a elektromotor jako rozhodující prvky současných elektromobilů lze konkrétně v prostředí Comsol Multiphysics modelovat, simulovat a optimalizovat topologii elektromotoru, typy vnitřních sestav, ztráty, tepelné toky, demagnetizaci, vibrace a hluk i např. magnetostrukturu (obr. 6).

K modelování baterií se přistupuje stupňovitě, bez ohledu na typ baterie. Je možné modelovat baterii od mikroskopického vzorku porézního prostředí elektrody přes model jednoho jediného článku po model ucelené sestavy článků. Simuluje se jak úplná, tak i zjednodušená elektromagnetická formulace nejčastěji v přechodových jevech (nabíjecí cyklus) včetně elektrochemické impedanční spektroskopie. Z fyzikálního pohledu je možné zahrnout simulace proudění, přestup tepla a jeho účinky (chlazení, přehřívání, zkratové stavy s teplotní spirálou), stárnutí (pokovování, děje na rozhraní mezi elektrolytem a pevnou elektrodou v tzv. *Solid Electrolyte Interface* – SEI, me-

chanická degradace, únik elektrolytu atd).

Samostatnou oblastí jsou simulace palivových článků, pro které má software Comsol také předpřipravené řešení.

Simulace s použitím FEM jsou efektivním nástrojem pro vývoj inovativních řešení elektrických pohonů. Aby model věrně odrazil reálné použití zařízení, je nezbytné spolu s primárním fyzikálním principem zahrnout i jevy,

kteřé mohou negativně ovlivnit jeho celkovou efektivitu. Nástroj Comsol Multiphysics umožňuje v jediné simulaci propojit větší počet fyzikálních jevů a tím minimalizovat přehřívání, mechanické namáhání a další nežádoucí sekundární jevy v zařízení. Významnou předností je možnost propojit detailní simulaci na bázi FEM v Comsol Multiphysics s modelem zařízení v prostředí Simulink. Touto cestou lze vytvořit digitální dvojče (*Digital Twin*) klíčových součástí vozu.

## Závěr

Metoda MBD představuje moderní a flexibilní přístup k vývoji elektrických pohonů, a to i pro elektromobilitu. Založením vývoje na simulačních modelech zefektivňuje proces vývoje a umožňuje dodávat na trh produkty splňující veškeré požadavky na bezpečnost, spolehlivost, účinnost a výkon.

(Humusoft)