

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Digitálne dvojča a ANSYS

Učebný text

Oblasť aplikovaná mechatronika, numerické modelovanie
a multifyzikálne simulácie

Obsah

Úvod	1
1 Digitálne dvojča	2
1.1 Fyzicky – digitálny svet.....	2
1.2 Tvorba digitálneho dvojčaťa.....	4
1.3 Biznis hodnota	7
2 ANSYS.....	9
2.1 Multiphysics Simulation.....	11
2.2 ANSYS System	16
2.3 ANSYS Twin Builder.....	17
3 ANSYS & ThingWorx - digitálne dvojča čerpadla.....	21
3.1 Návrh digitálneho dvojčaťa čerpadla.....	22
Záver.....	29
Zdroje	30

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Prepojenie fyzikálneho a digitálneho sveta.....	3
Obr. 2 Konceptuálny model digitálneho dvojčaťa	4
Obr. 3 Edge – prepojenie s vonkajším svetom.....	5
Obr. 4 Iteračný model.....	6
Obr. 5 ANSYS – Využitie pri tvorbe kancelárskej stoličky	9
Obr. 6 Model ropnej plošiny vytvorený pomocou programu ANSYS	10
Obr. 7 ANSYS - platforma.....	11
Obr. 8 ANSYS Maxwell – simulácia elektromagnetického poľa	12
Obr. 9 ANSYS HFSS – Simulácia antény namontovanej na ISS	12
Obr. 10 ANSYS Icepak - prúdenie vzduchu, teplota a prenos tepla	13
Obr. 11 ANSYS - Deformácia projektilu.....	14
Obr. 12 ANSYS CFD simulácia - SpaceX Dragon.....	15
Obr. 13 Použitie simulácie v prevádzke prostredníctvom ANSYS Twin Builder	17
Obr. 14 ANSYS HMI – kokpitový displej pre lietadlo.....	18
Obr. 15 XiL model	18
Obr. 16 ANSYS - HMI obrazovka.....	19
Obr. 17 ANSYS Twin Builder - technické možnosti.....	20
Obr. 18 ThingWorx – prepojenie nižších vrstiev so systémami	21
Obr. 19 HPE GL20 – gateway	22
Obr. 20 Prepojenie čerpadla s digitálnym dvojčaťom pomocou ThingWorx	23
Obr. 21 ThingWorx – webová aplikácia čerpadla.....	24
Obr. 22 ThingWorx – virtuálna realita.....	25
Obr. 23 ANSYS – Návrh čerpadla + HMI obrazovka	27
Obr. 24 3D simulačný model ukazuje, že kavitácia (vizualizovaná fialovými bublinami pary) je príčinou problému s vibráciami.....	28

Zoznam skratiek a značiek

CAD	Počítačom podporovaný návrh
CFD	Výpočtová dynamika kvapalín
ERP	Plánovanie podnikových zdrojov
IIoT	Priemyselný internet vecí
ISS	Medzinárodná vesmírna stanica
MKP	Metóda konečných prvkov
MES	Podnikový informačný systém
MoM	Metóda momentov
HMI	Rozhranie človek-stroj

Úvod

Simulácia je už dlho súčasťou procesu vývoja produktu. Vďaka simulácií vieme optimalizovať výkonnosť produktu, znížiť náklady na jeho vývoj a uviesť ho rýchlejšie na trh. Najnovšie technológie umožňujú vykonávať simulácie, ktoré sa javia ako keby prebiehali v reálnom svete. K zníženiu nákladov dochádza najmä tým, že produkt nie je nutné fyzicky vyrobiť, stačí jeho digitálny návrh, ktorý sa dokáže virtuálne otestovať a optimalizovať. Týmto sa eliminuje potreba stavať niekoľko prototypov produktu pred jeho nasadením. Technológia, ktoré ponúka možnosť simulácie zariadenia vo virtuálnom svete je napr. digitálne dvojča, ktoré je súčasťou Industrial Internet of Things.

Cieľom práce je priniesť prehľad o technológií digitálneho dvojčata s možnosťou prepojenia s vývojom softvérom ANSYS. Úvodná kapitola sa venuje opisu digitálneho dvojčata, prepojeniu s fyzickým svetom, popisuje kroky jeho návrhu a na záver prináša zhrnutie vo forme biznis hodnoty získanej pomocou danej technológie.

Práca sa zameriava aj na softvér ANSYS, nakoľko ponúka veľké množstvo multifyzikálnych simulácií, ktoré je možné využiť v digitálnom dvojčati. Opísané sú vybrané softvérové komponenty a ich využitie v reálnom svete, ktoré ANSYS ponúka. Súčasťou kapitoly je aj opis softvérového komponentu ANSYS Digital Twin. Ako už názov napovedá, zameriava sa na digitálne dvojča.

Záverečná kapitola sa sústreďí na prepojenie ANSYS-u a digitálneho dvojčata. Prepojenie je demonštrované na čerpadle, ktoré patrí k najpoužívanejším strojom vo výrobe. Pre zabezpečenie komunikácie a získavanie údajov medzi fyzickým čerpadlom a jeho digitálnom dvojčatom bola využitá platforma ThingWorx.

1 Digitálne dvojča

Digitálne dvojča predstavuje digitálnu kópiu fyzického objektu, procesu alebo systému, ktorá môže byť využitá na monitorovanie a analýzu v reálnom čase, predikovanie údržby alebo na optimalizáciu. Technológia digitálneho dvojčata neustále rastie a rozšírila sa tak, aby bola schopná vytvárať digitálne kópie budov, tovární a dokonca aj miest. Digitálne dvojča využíva umelú inteligenciu a strojové učenie, čím dokáže vytvárať živé digitálne simulačné modely, ktoré sa aktualizujú a menia, keď sa menia aj ich fyzické náprotivky. Digitálna kópia sa učí pomocou údajov zo senzorov a kontrolných prvkov, ktoré prinášajú rôzne aspekty správania fyzickej predlohy v rôznych prevádzkových podmienkach. Údaje z reálneho sveta sa prevádzajú do digitálneho sveta, kde je možné vykonať analýzu – simuláciu.

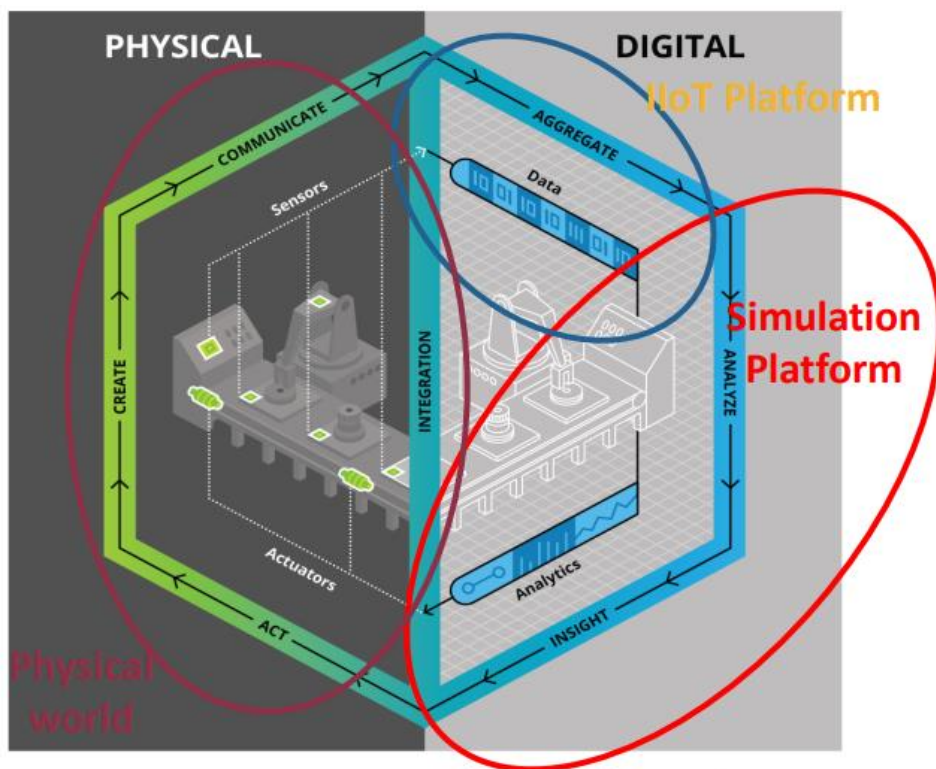
Do digitálnej kópie vieme zapracovať aj poznatky od odborníkov, ktorí majú rozsiahle a relevantné poznatky v danom odvetví. Súčasťou digitálneho dvojčata sú aj historické údaje, ktoré môžu skvalitniť optimalizačný model. Digitálne dvojča je možno použiť na zlepšenie dizajnu fyzického produktu počas celého životného cyklu produktu.

1.1 Fyzicky – digitálny svet

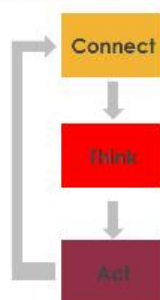
Prepojenie fyzického a digitálneho sveta (Obr. 1) je možné rozložiť do šiestich celkov [1]:

- **Senzory a ovládacie prvky z fyzického sveta** – sú roz distribuované v celom výrobnom procese, pričom vytvárajú signály, ktoré umožňujú digitálnemu dvojčatu zachytiť prevádzkové a environmentálne údaje týkajúce sa fyzického procesu - zariadenia v reálnom svete.
- **Údaje** – Skutočné prevádzkové a environmentálne údaje zo senzorov sú agregované kombinované s údajmi z podniku, ktoré sú napríklad:
 - Konštrukčné špecifikácie
 - Výkresy
 - Údaje z podnikových systémov – cena jednotlivých vyrábaných produktov, ceny využívaných materiálov, sťažnosti zákazníkov a mnoho ďalších informácií.
- **Integrácia** – Sensory prenášajú údaje do digitálneho sveta prostredníctvom integračnej technológie (ktorá zahŕňa brány – sieťové uzly, komunikačné rozhrania a bezpečnosť), pričom komunikácia musí prebehať aj spätne, t.j. digitálny svet – fyzikálny svet.

- **Analýza** – Údaje, ktoré prúdia do digitálneho dvojčata sa analyzujú rôznymi algoritmi, na základe ktorých je možné získať rôzne poznatky o procese - zariadení.
- **Kontinuálna aktualizácia digitálneho dvojčata** – Vďaka neustálej aktualizácii môžeme, napríklad identifikovať neprípustné odchýlky od optimálnych hodnôt, ktoré by mohli v budúcnosti nastať. Takáto odchýlka je prípad optimalizácie podnikania. Predčasne identifikovanie odchýlky je príležitosť, ktorá môže viesť k zníženiu nákladov alebo zlepšeniu kvality – efektívnosti výroby.
- **Akčné členy** – Zmeny vykonané v digitálnom svete sa prejavujú v reálnom svete pomocou akčných členov, ktoré môžu byť ovládané digitálnym dvojčatom, prípadne podliehajú ľudskej zásahu vo výrobe.



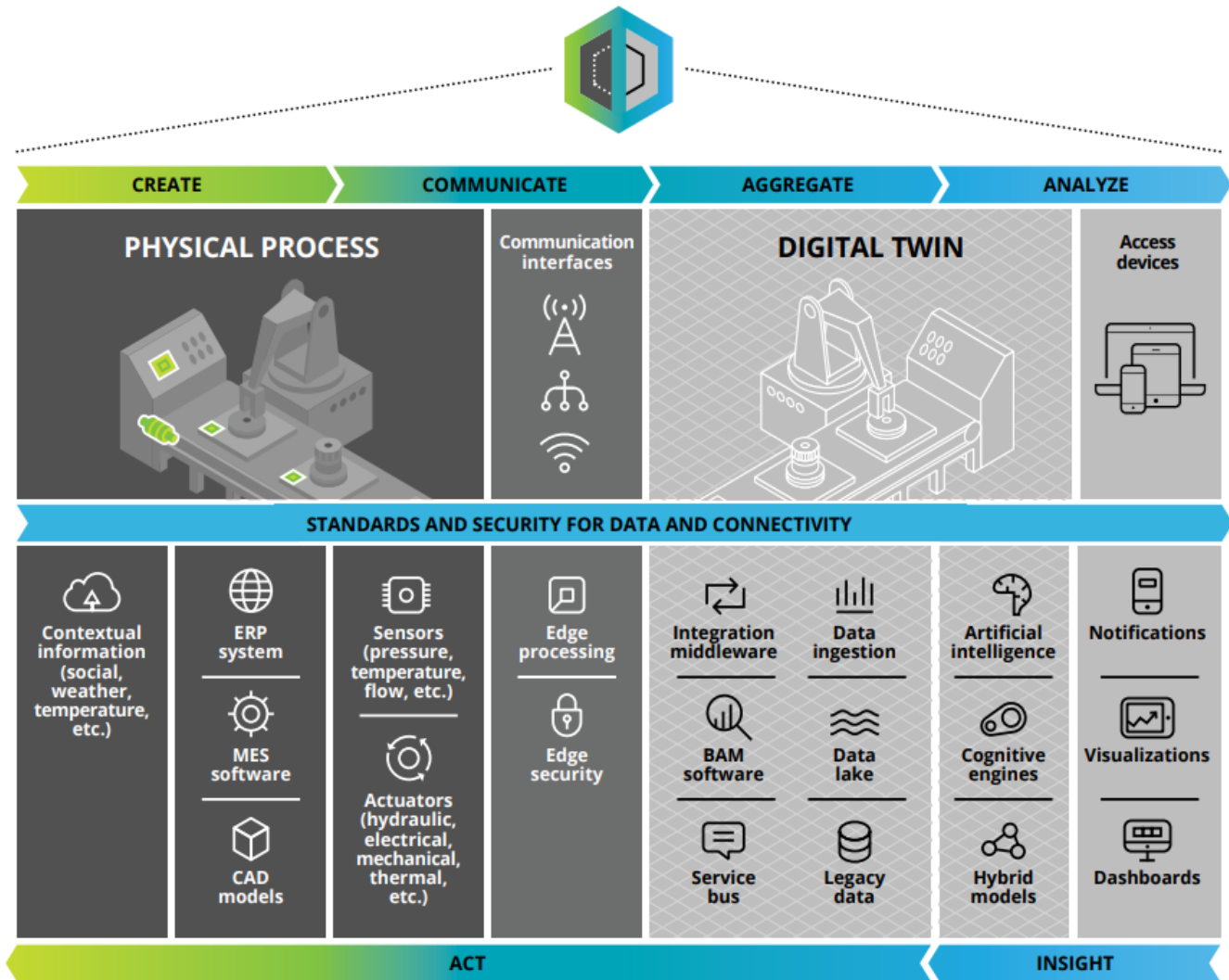
Simulation-driven Product Operation



Obr. 1 Prepojenie fyzikálneho a digitálneho sveta

1.2 Tvorba digitálneho dvojčata

Architektúra digitálneho dvojčata opísaná v predchádzajúcej kapitole predstavovala všeobecný pohľad, pričom nasledujúca architektúra (Obr. 2) zobrazuje konceptuálny návrh, t. j. možno ju považovať za “Model tvorby digitálneho dvojčata”.



Obr. 2 Konceptuálny model digitálneho dvojčata

Tvorbu digitálneho dvojčata možno rozdeliť do šiestich krokov [1]:

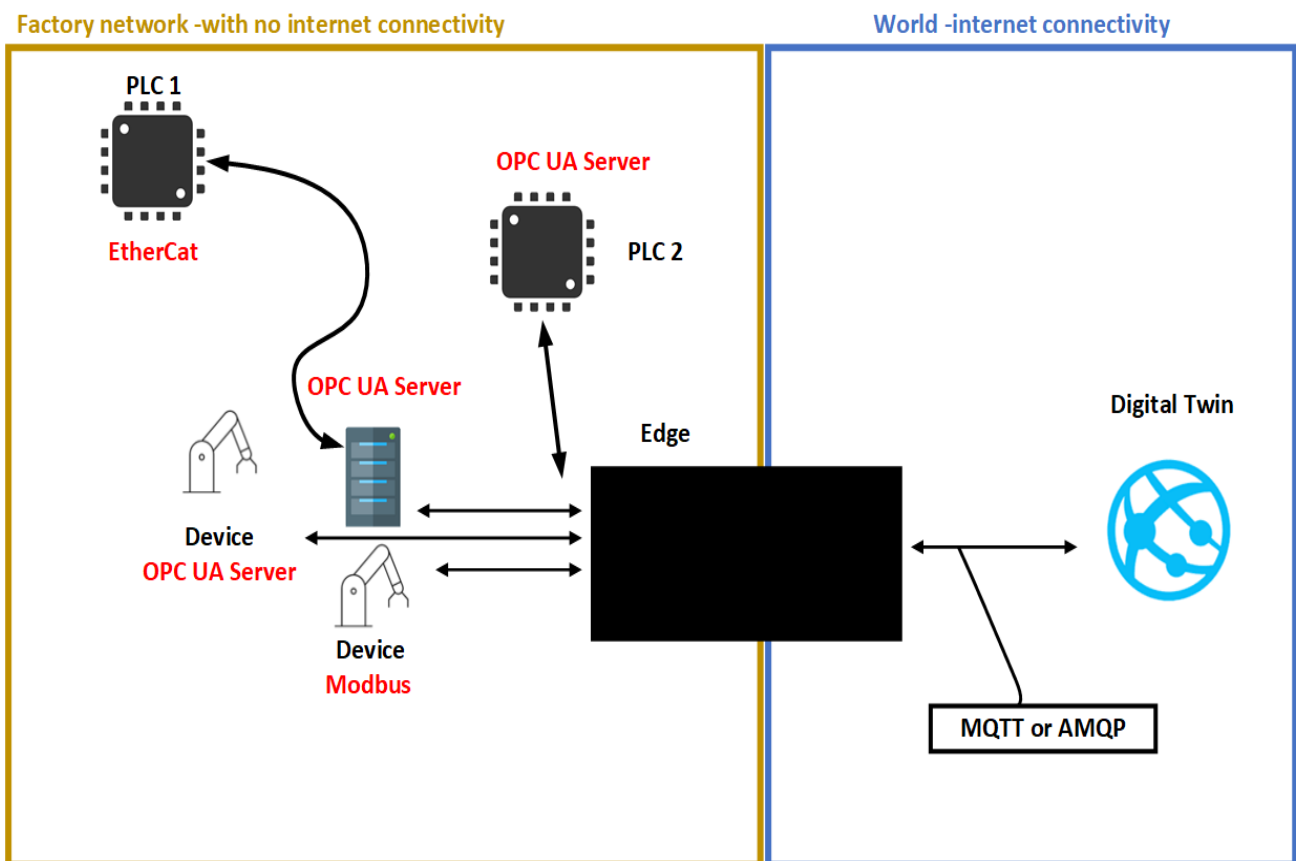
1. **Tvorba** – Prvý krok predstavuje vybavenie fyzického procesu veľkým počtom senzorov, ktoré zabezpečujú meranie vstupov-výstupov z fyzického procesu a zároveň aj z jeho okolia. Sensory môžu byť rozdelené do dvoch skupín:
 - I. **Prevádzkové merania týkajúce sa fyzickej výkonnosti výrobného procesu** – Do tejto skupiny patrí napríklad pevnosť v ťahu, posunutie, točivý moment.

II. Prostredie a externé vplyvy ovplyvňujúce fyzický proces výroby - Sem patrí napríklad barometrický tlak, vlhkosť alebo teplota okolia.

Získané údaje zo senzorov môžu byť rozšírené o procesné informácie zo systému, napríklad o údaje z podnikového systému plánovania zdrojov alebo CAD modelov.

2. Komunikácia – Zabezpečuje integráciu fyzického procesu a digitálneho dvojčata. Skladá sa z troch komponentov:

- I. Edge –** Predstavuje hranu medzi fyzickým procesom a digitálnym dvojčatom. Spracováva údaje a prenáša ich naprieč platformou. Edge poskytuje preklad protokolov (Obr. 3) z fyzickej výroby (OPC UA, Modbus, EtherCAT a mnoho ďalších) do protokolov, ktoré je možné využiť na komunikáciu vo vyšších vrstvách (MQTT, AMQP, HTTPS a mnoho ďalších).



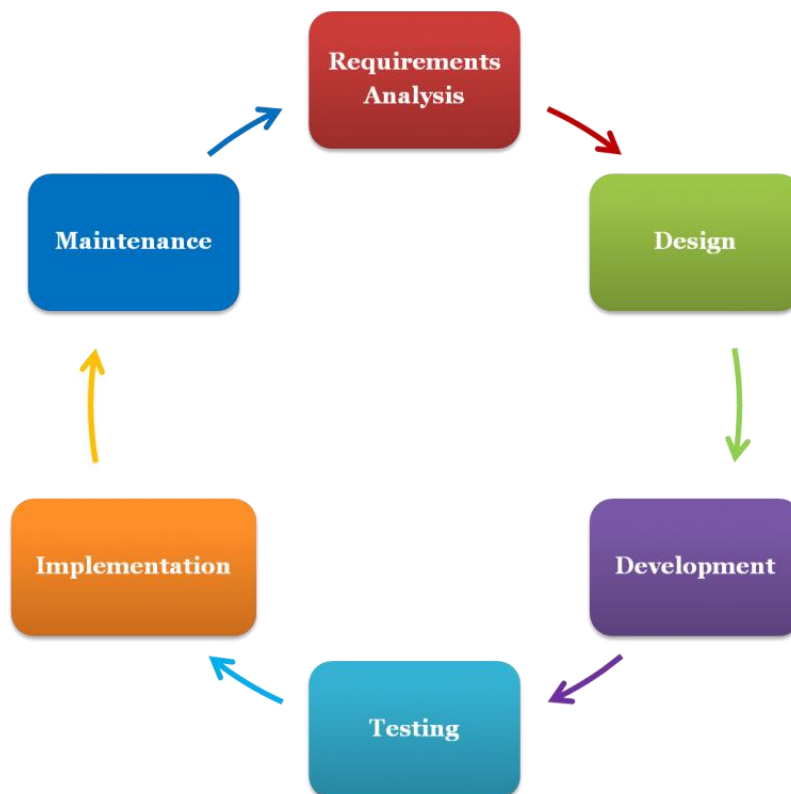
Obr. 3 Edge – prepojenie s vonkajším svetom

II. Komunikačné rozhrania – Pomocou komunikačných rozhraní môže dochádzať k výmene informácií medzi snímačom, akčným členom a celým

systemom. Ku komunikačným rozhraniam patrí napríklad RS 232, LPT, USB, Ethernet, Bluetooth. Výber komunikačného rozhrania závisí od umiestnenia senzoru, ktorý sa môže nachádzať na rôznych miestach - továrne, domácnosti, banská prevádzka.

III. Edge zabezpečenie – Nové možnosti senzorov a komunikácie vytvorili nové problémy spojené s bezpečnosťou. Najbežnejšími bezpečnostnými opatreniami je využívanie firewall-ov, šifrovania a certifikátov. Riešenia, ktoré bezpečne umožnia využívať digitálne dvojčinky sa musia stále vyvíjať a adaptovať na novo vznikajúce hrozby.

3. **Agregácia** – Agregácia údajov je proces, pri ktorom sa zhromažďujú údaje a sú vyjadrené v súhrnnej forme pre účel analýzy. Zhromažďovanie údajov sa môže vykonať priamo v zariadeniach alebo v cloud-e.
4. **Analýza** – V analytickom kroku sa údaje analyzujú a vizualizujú. Na základe analýzy môžeme vytvoriť iteračný model, z ktorého dokážeme získať poznatky na základe ktorých môžeme optimalizovať skúmaný proces. Poznatky získané z iteračného modelu (Obr. 4) môžu byť nápomocné aj pri rôznych rozhodnutiach, ktorým môžeme počas životného cyklu procesu čeliť.



Obr. 4 Iteračný model

5. **Náhl'ad** – Poznatky získané z analýzy sú prezentované prostredníctvom informačných panelov, kde sú vizualizované a môžu poukazovať na neprijateľné rozdiely vo výkonnosti digitálneho dvojčata a fyzickej reálnej implementácii procesu. Vďaka zistenej nekonzistencii digitálneho dvojčata a fyzického procesu, je možné vyšetriť oblasť vo fyzickom procese, ktorá zaostáva za výsledkami získanými z digitálneho dvojčata.
6. **Akt** – Poznatky získané v predchádzajúcich krokoch je možné vrátiť späť do fyzického procesu prostredníctvom akčných členov, ktoré riadia napr. pohonné systémy, natočenie ventilov a iné zariadenia, ktoré sa vyskytujú vo výrobe. Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, akčné členy môžu byť riadené pomocou digitálneho dvojčata alebo môžu vyžadovať ľudský zásah.

1.3 Biznis hodnota

Technológia tvorby digitálneho dvojčata sa neustále rozvíja, pričom narastá aj jej biznis hodnota, ktorá je opísaná v nasledujúcej tabuľke:

Kategória	Potenciálna biznis hodnota
Prevádzkové náklady	Zlepšenie výkonnosti výrobných zariadení Zlepšenie návrhu produktov Zníženie variability procesov
Náklady na zavedenie produktu a čas na prípravu	Zníženie času uvedenia nového produktu na trh Znížte celkových nákladov na výrobu nového produktu
Príležitosti na rast príjmov	Identifikovanie produktov v procese, ktoré sú pripravené na inováciu Zlepšenie efektivity a nákladov na servis produktov
Kvalita	Zlepšenie celkovej kvality Predvídanie a zistenie chýb spojených s kvalitou

2 ANSYS

Ak ste niekedy videli raketový štart, lietali s lietadlom, riadili auto, používali počítač, sedeli na kancelárskej stoličke (Obr. 5), dotýkali sa mobilného zariadenia alebo prešli mostom je pravdepodobné, že ste použili výrobok, pri ktorom ANSYS zohral rozhodujúcu úlohu pri jeho tvorbe. ANSYS je schopný vytvárať modely malých aj veľkých komplexov, akým je napríklad ropná plošina (Obr. 6).

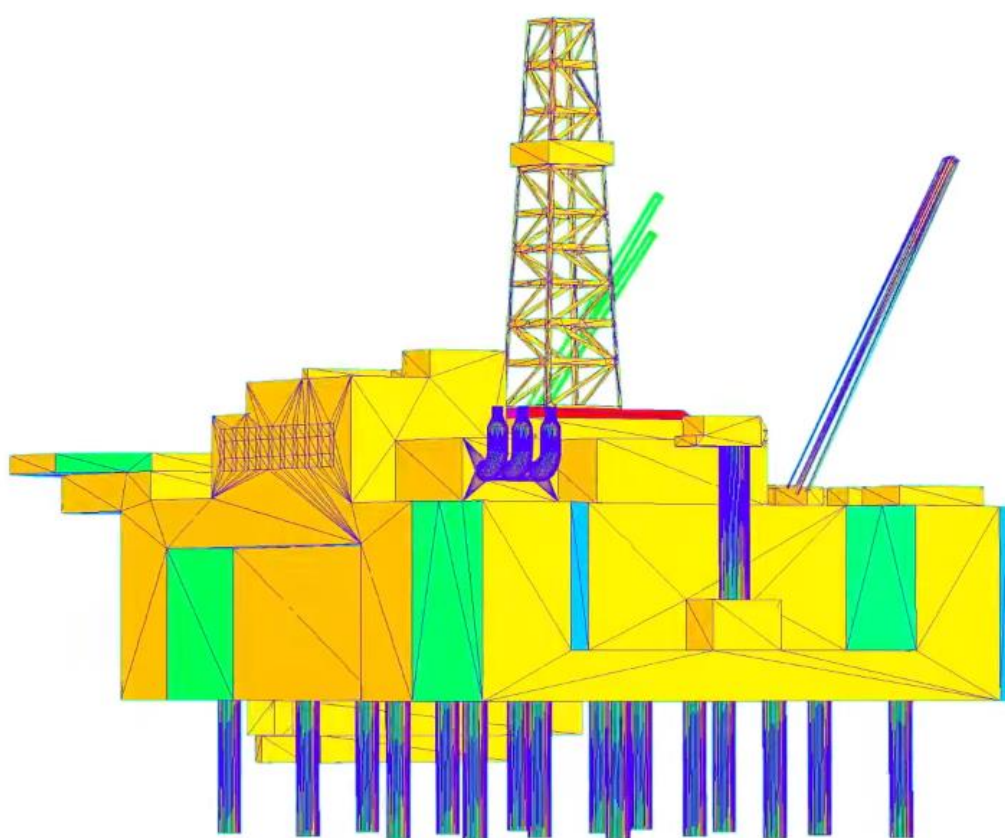
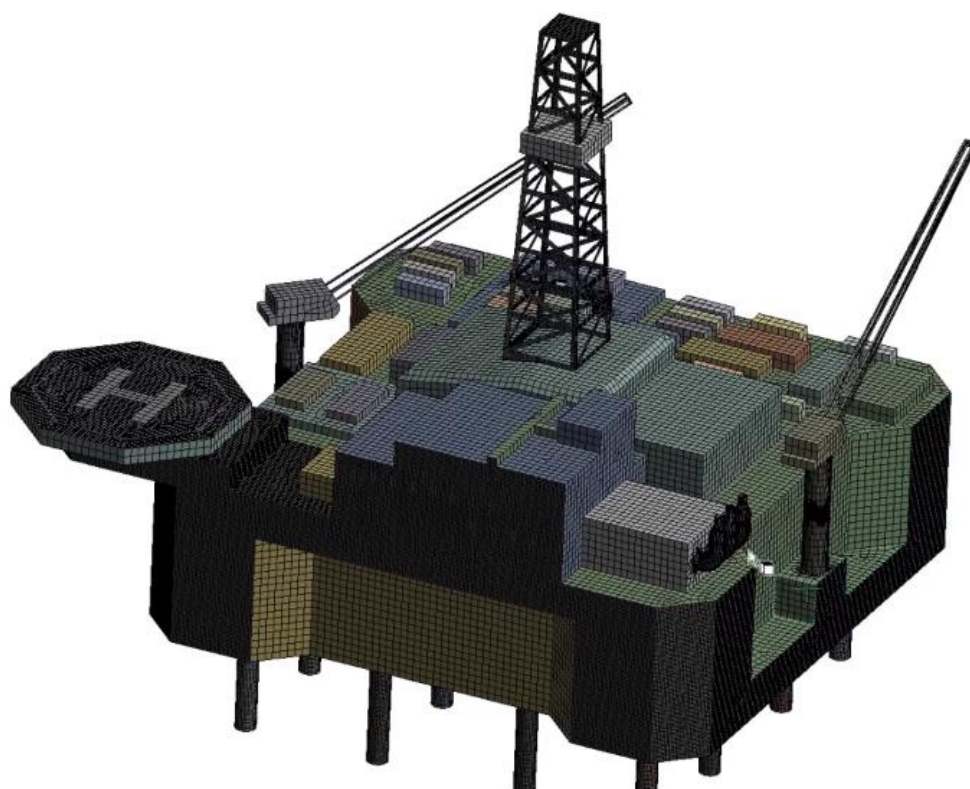


Obr. 5 ANSYS – Využitie pri tvorbe kancelárskej stoličky

Spoločnosť ANSYS pôsobí na trhu od roku 1970 a zamestnáva takmer 3000 profesionálov, z ktorých mnohí sú inžinieri s titulom PhD. v oblasti:

- Analýzy konečných prvkov
- Výpočtovej dynamiky kvapalín
- Elektroniky
- Polovodičov
- Vstavaného softvéru
- Optimalizácie návrhu

ANSYS je uznávaná ako jedna z najinovatívnejších spoločností, o čom svedčia aj publikácie v magazínoch ako Bloomberg Businessweek alebo FORTUNE.

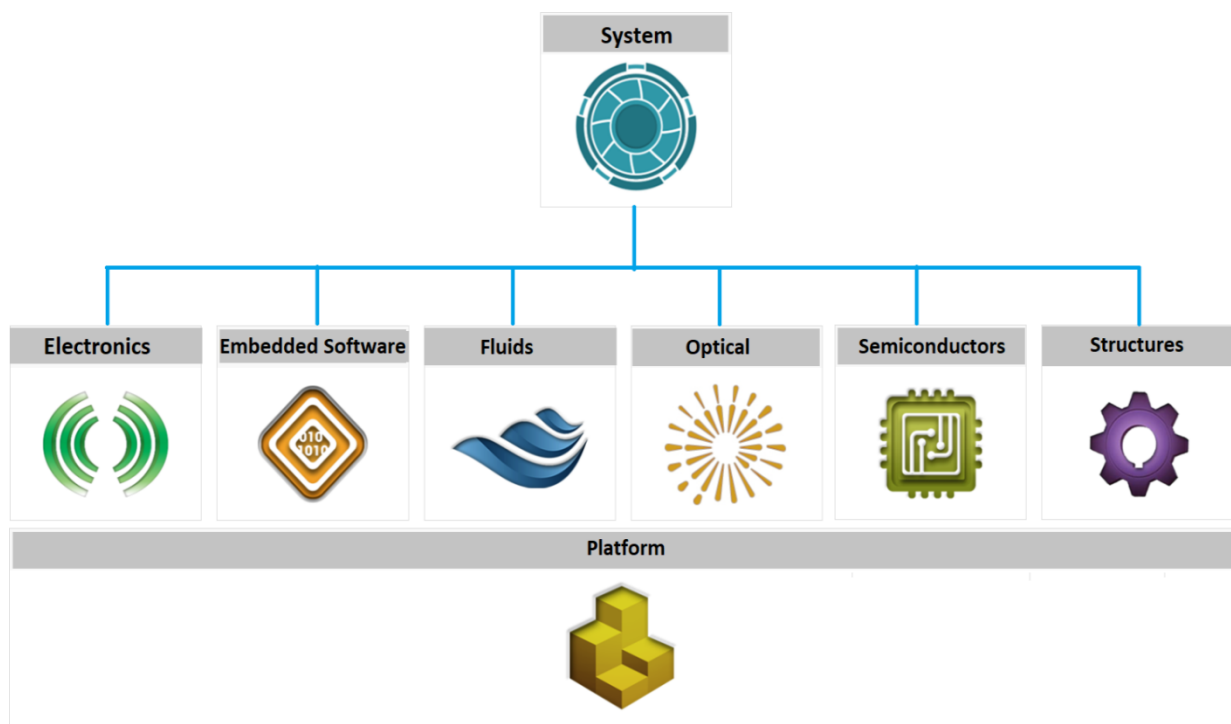


Obr. 6 Model ropnej plošiny vytvorený pomocou programu ANSYS

2.1 Multiphysics Simulation

Moderné štruktúry sú zložité a detailné pochopenie ako fungujú, predstavuje kľúč k bezpečnej a spoľahlivej prevádzke. Sila tekutín, tepelné účinky, štruktúrna integrita a elektromagnetické žiarenie môžu mať vplyv na výkonnosť daného produktu. Ak by sme izolovali tieto sily a preskúmali ich samostatne, pravdepodobne by sme nemali presné predpovedanie správania sa produktu. Avšak ANSYS Multiphysics ponúka možnosť preskúmať tieto sily pôsobiace na produkt v akýchkoľvek kombináciách a tým dosiahnuť maximálnu vernosť riešenia. Vďaka riešeniu, ktoré dokáže simulovať správanie produktu v rôznych podmienkach môžeme navrhovať bezpečné a efektívne produkty.

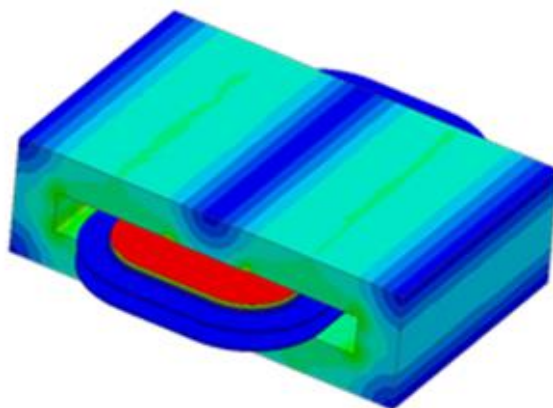
ANSYS ponúka komplexný softvérový balík, ktorý pokrýva celú škálu fyziky a poskytuje prístup k prakticky akejkoľvek oblasti inžinierskej simulácie, ktorú proces návrhu vyžaduje. Platforma ANSYS (Obr. 7) sa delí do hlavných šiestich celkov, pričom jednotlivé celky obsahujú produkty-softvéry, ktoré spoločnosť ponúka. Nasledujúce odstavce popisujú hlavné celky a vybrané produkty z jednotlivých celkov [2]:



Obr. 7 ANSYS - platforma

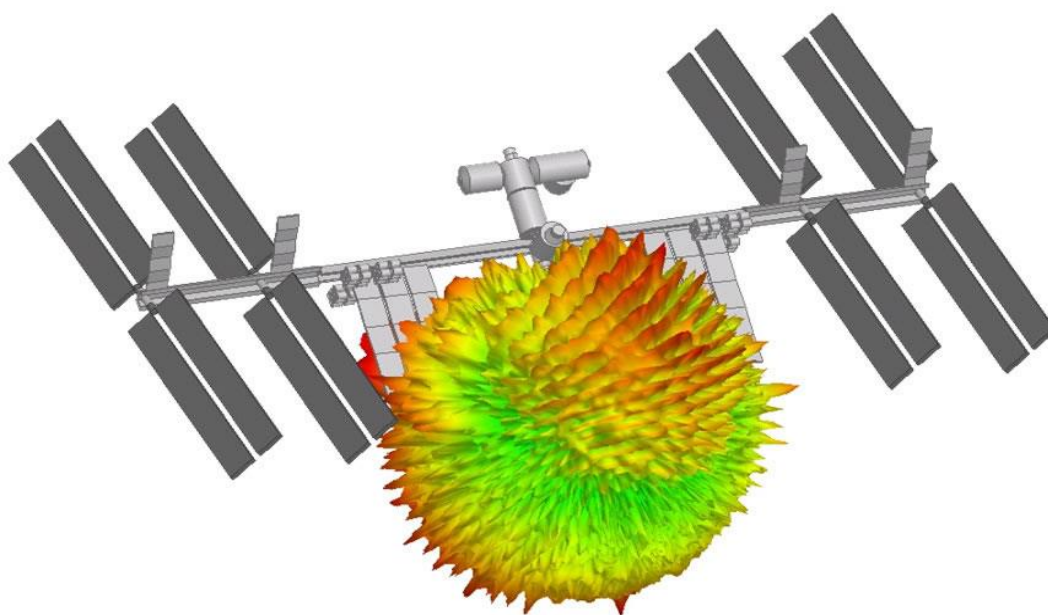
- **Electronics** – ponúka simuláciu pre nízko/vysokofrekvenčné zariadenia - pokročilé komunikačné systémy, vysokorýchlostné elektronické zariadenia, elektromechanické komponenty a systémy výkonovej elektroniky. Súčasťou celku je aj napríklad:

- **ANSYS Maxwell** - slúži na simuláciu nízko-frekvenčných elektromagnetických polí (Obr. 8). Je založený na metóde konečných prvkov (MKP) a umožňuje simulácie elektromagnetických polí v časovej i frekvenčnej oblasti. Sieť vytvára automaticky a pri simulácii zohľadňuje rotačný a translačný pohyb telies v elektromagnetickom poli. Využíva sa pri návrhu elektromotorov, generátorov, transformátorov a senzorov.



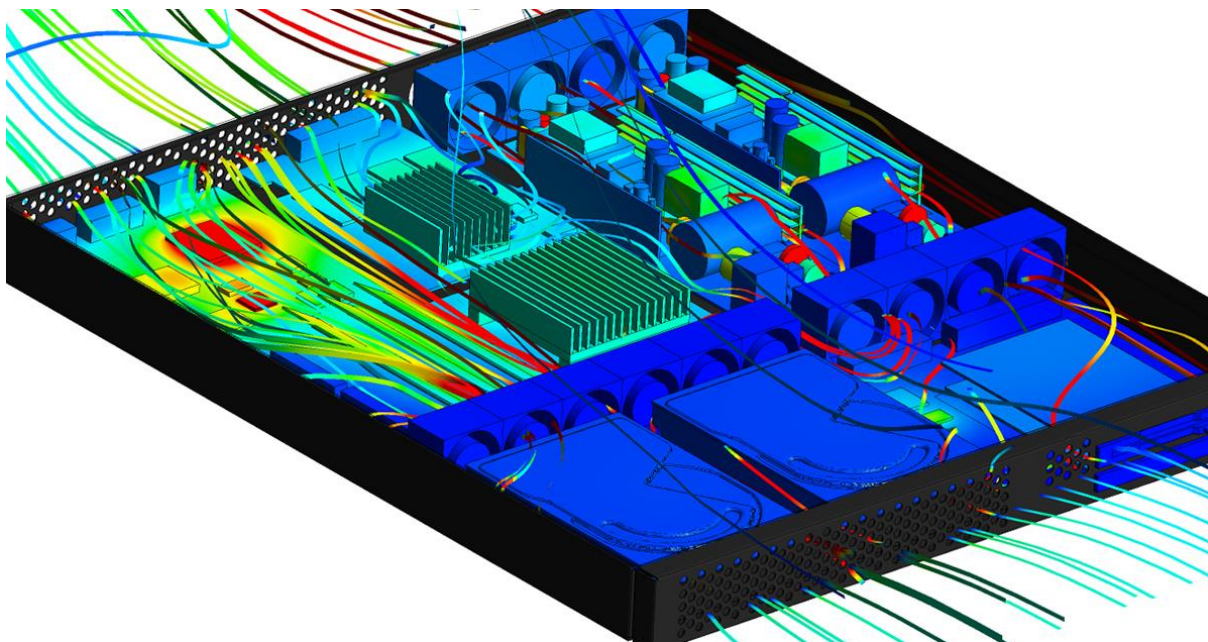
Obr. 8 ANSYS Maxwell – simulácia elektromagnetického poľa

- **ANSYS HFSS** – Simulácie vysokofrekvenčných elektromagnetických polí (Obr. 9). Využíva simulačné algoritmy na báze konečných prvkov (MKP), metódy momentov (MoM) a pokročilých hybridných metód (MKP + MoM). Pokročilé hybridné metódy umožňujú riešiť mikrovlny. Využíva sa pri návrhu antén, radarov, čipov.



Obr. 9 ANSYS HFSS – Simulácia antény namontovanej na ISS

- **ANSYS Icepak** - Simulácia chladenia elektroniky. Vďaka ANSYS Icepak dokážeme predpovedať prúdenie vzduchu, teplotu a prenos tepla (Obr. 10) v integrovaných obvodov, doskách plošných spojov a elektronických zostavách (Grafická karta, PC).

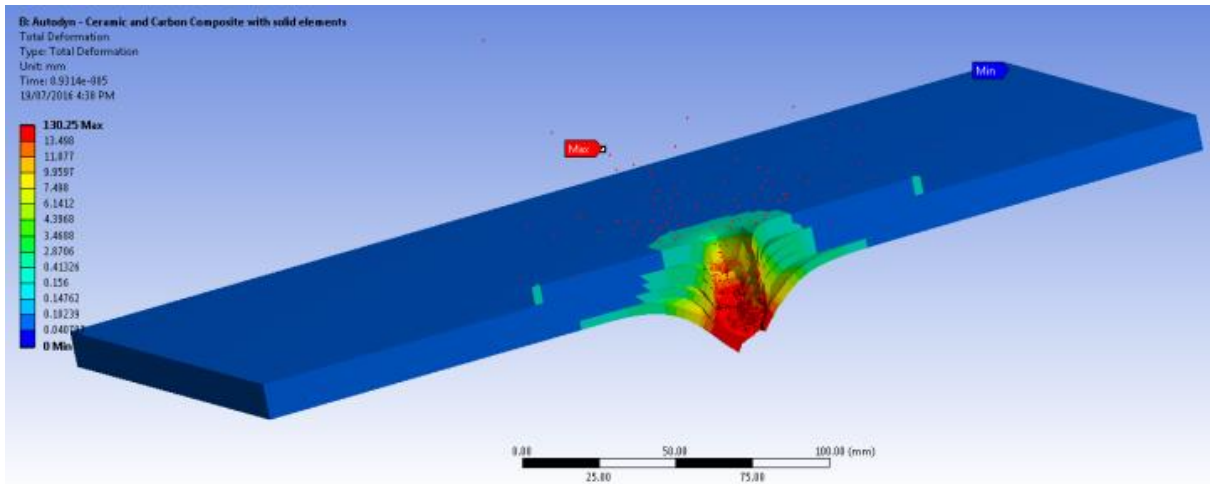


Obr. 10 ANSYS Icepak - prúdenie vzduchu, teplota a prenos tepla

- **Structure** – Simulácia mechanických konštrukcií. Do celku patrí produkt:
 - **ANSYS Mechanical Enterprise** – Poskytuje testovanie a analýzu zložitých dielov a celých konštrukčných zostáv. Softvér je založený na MKP, pričom ponúka automatickú tvorbu siete na základe zvolenej simulácie s možnosťou nastaviť parametre sieťovania a zjemnenia. Oblasť riešených problémov zahŕňa teplotné úlohy (ustálený stav aj priebeh teplôt v čase), lineárne a nelineárne štrukturálne úlohy a dynamické analýzy:
 - Modálna
 - Harmonická
 - Spektrálna
 - Analýza s náhodným buđením
 - Analýzu prechodných dejov
 - Analýza dynamiky robotov
 - Výpočet dynamiky tuhých telies v kombinácii s pružnými telesami

ANSYS Mechanical Enterprise sa využíva pri návrhu a simulácií správania produktov v rôznych oblastiach, napríklad:

- Výroba – prevodoviek, podvozkov, ložísk, turbín, rámov strojov, ozubených kolies, schodísk, mostov, tunelov, budov, robotov a žeriavov.
- Simulácie – nárazov, pádových skúšok, deformácie projektilov, vibračná analýza motorov, potrubných systémov.

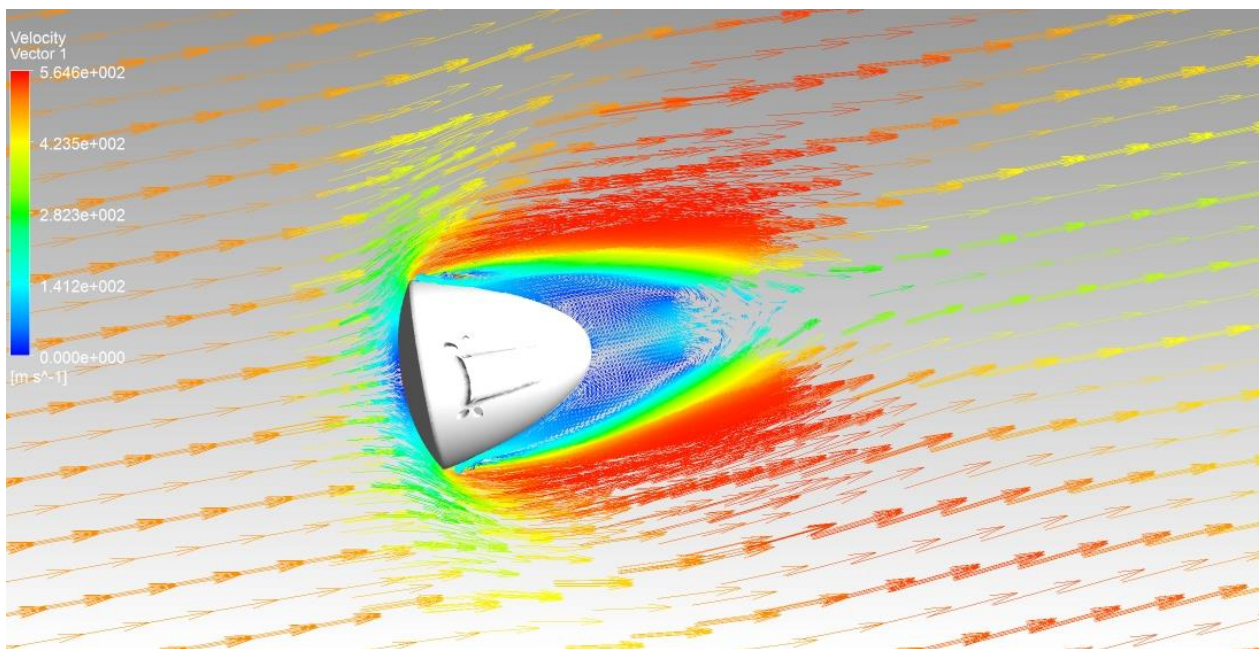


Obr. 11 ANSYS - Deformácia projektilu

- **Semiconductors** – Vďaka pokroku v moderných technológiách je možné vyrábať polovodičové súčiastky v menších rozmeroch, s vyšším výpočtovým výkonom a nízkom energetickom príkone. ANSYS počíta pri návrhu integrovaných obvodov so šumovými oblasťami, s elektromigráciou, tepelnými javmi a javom elektrostatického výboja. Semiconductors obsahuje produkty:
 - **ANSYS RedHawk** – riešenia v oblasti napájania a spoľahlivosti integrovaných obvodov.
 - **ANSYS PowerArtist** – návrh napájania nízko-spotrebných polovodičových systémov.
 - **ANSYS Totem** – návrh analógových, zmiešaných a digitálnych obvodov.
 - **ANSYS PathFinder** – plánovanie a verifikácia konečných riešení zamierujúcich sa na odolnosť proti statickej elektrine.
 - **ANSYS SeaHawk** - optimalizácia čipových systémov.
- **Fluids** – Komplexná simulácia dynamiky tekutín, t. j. simulácia prúdenia tekutín a šírenia tepla. Vďaka Fluids dokážeme simulovať stlačiteľné a nestlačiteľné prúdenie, jedno a viac fázové prúdenie, spaľovanie, tok častíc, tvorbu námrazy na lietadle a iné.

Pri riešení fyzikálnych problémov využíva rôzne sofistikované modely, napr. Menter-Langtry laminárne-turbulentný model [3], ktorý sa využíva pri modelovaní turbulencie. Súčasťou Fluids sú napr. produkty:

- **ANSYS CFD Enterprise** - obsahuje všetky produkty ANSYS pre výpočet dynamiky kvapalín a simuláciu chemických procesov.
- **ANSYS CFX** – simulácia lopatkových strojov.
- **ANSYS Forte** – nástroj na simuláciu spaľovanie a spaľovacích strojov.
- **ANSYS FENSAP-ICE TURBO** – simulácia námrazy v prúdových lietadlách.



Obr. 12 ANSYS CFD simulácia - SpaceX Dragon

- **Embedded Software** - Vstavaný softvér sa čoraz viac používa v inteligentných zariadeniach, ale nedokonalý kód môže byť príčinou mnohých porúch produktov. Na zvládnutie tohto rizika a na splnenie vyšších štandardov pre certifikáciu softvéru je potrebné využívať nástroje na vývoj vstavaného softvéru a certifikované generátory kódu. ANSYS poskytuje vývojové a simulačné prostredie založené na modeloch so vstavaným automatickým generátorom kódu. Systémoví a softvéroví inžinieri používajú riešenia ANSYS SCADE na grafické navrhovanie, overovanie a automatické generovanie softvérových aplikácií s vysokými požiadavkami na spoľahlivosť. Riešenia SCADE sú vysoko interoperabilné a môžu byť ľahko integrované. Do kategórie Embedded Software patrí:
 - **ANSYS SCADE Display** - Poskytuje prostredie pre grafický dizajn a vývoj rozhrania človek-stroj (HMI).

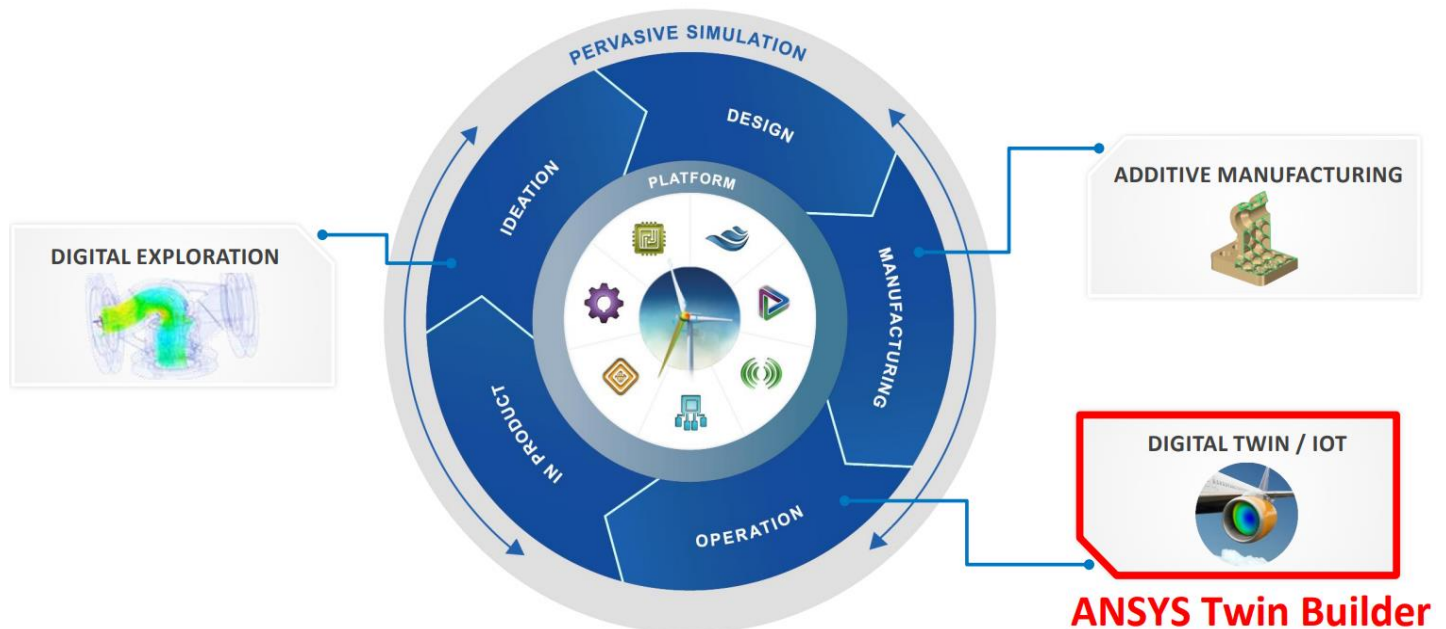
- **ANSYS SCADE Suite** - Návrh pre kritické aplikácie - modely, simulácie, certifikácia generovaného kódu a interoperability s inými vývojovými nástrojmi a platformami.
- **ANSYS SCADE Architect** - Návrhové prostredie pre systémy s vysokými požiadavkami na spoľahlivosť.
- **Optical** – Navrhovanie optických systémov, pričom softvér ANSYS dokáže jednoznačne simulovať optický výkon v systéme a môže vyhodnotiť konečný efekt osvetlenia. Softvér ponuky v rámci Optical je:
 - **ANSYS SPEOS** - Softvér na návrh, optimalizáciu, vizualizáciu a validáciu optického systému.
 - **ANSYS VRXPERIENCE** - Interaktívna platforma na vytváranie a testovanie vášho produktu alebo systému v reálnych podmienkach pomocou virtuálnej reality. Vďaka VRXPERIENCE dokážeme napr. simulovať jazdu vozidla.

2.2 ANSYS System

Keďže komplexnosť produktov rastie, tým rovnako narastá aj výzva integrácie jednotlivých komponentov do systému aby sa zabezpečilo, že budú spolupracovať podľa očakávania. Modelovanie, simulácia a validácia systémov umožňujú vytvoriť kompletný digitálny prototyp, ktorý môže slúžiť na pochopenie a optimalizáciu procesov, počas celého životného cyklu produktu. Súčasťou kombinovaného modelu systému môžu byť „Big data“ a údaje zo snímačov, pomocou ktorých dokážeme rozvinúť digitálne dvojča, a riadiť výkon a údržbu produktu po jeho nasadení. ANSYS System predstavuje prepojenie hlavných šiestich celkov, ktoré boli spomenuté v predchádzajúcej kapitole. Súčasťou ANSYS System je aj ANSYS Twin Builder, ktorému je venovaná nasledujúca kapitola.

2.3 ANSYS Twin Builder

ANSYS Twin Builder využíva silu modelárskeho systému ANSYS. Využíva kompletný ekosystém jednotlivých produktov, ktorému mu ANSYS ponúka (Obr. 13). Zlepšuje prediktívne výsledky údržby, čím šetrí náklady a optimalizuje prevádzku produktu. Hlavné využitie našiel v IIoT.



Obr. 13 Použitie simulácie v prevádzke prostredníctvom ANSYS Twin Builder

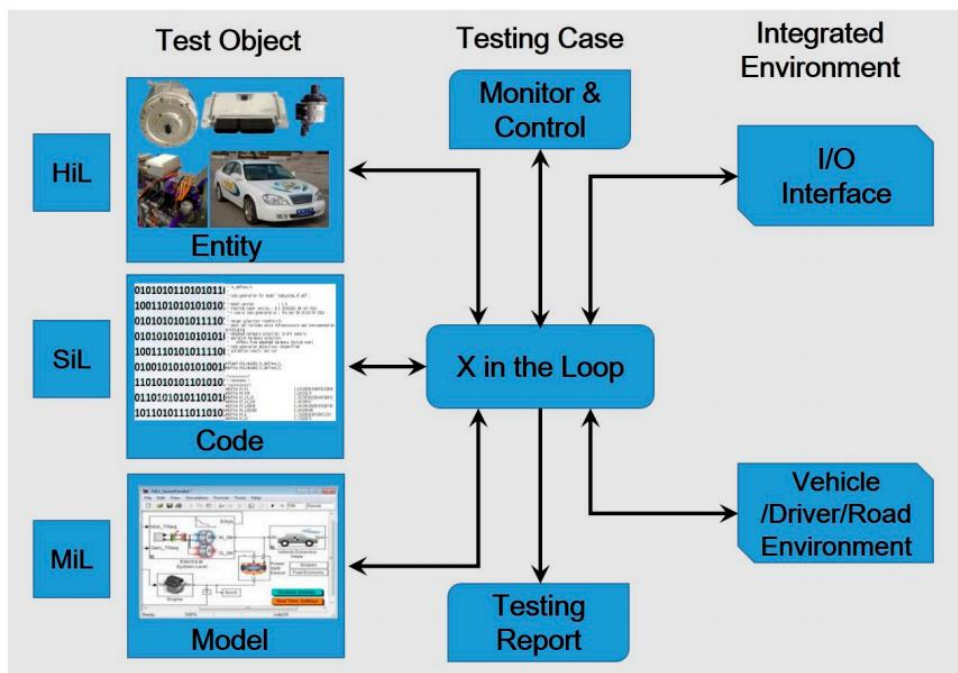
ANSYS Twin Builder (Obr. 17) sa skladá z troch hlavných krokov [4]:

- **Vybudovanie** – Predstavuje vytvorenie digitálneho dvojčata, pričom produkt ANSYS ponúka:
 - Podpora viacerých modelovacích domén – pri vývoji produktu sa môže preklínať viacero inžinierskych domén (napr. rotačná a translačná mechanika, teplota, elektrina), pričom vďaka ANSYS-u je možné vykonať modelovanie vo všetkých fyzikálnych doménach spolu, v jednom softvéri.
 - Rozsiahla ponuka knižníc – možnosť využívať komponenty bez nutnosti ich návrhu.
 - Podpora nástrojov tretích strán – napr. Matlab Simulink.
 - 3D modelovanie
 - Integrácia Embedded softvérov - ovládanie a zobrazenie (Obr. 14).



Obr. 14 ANSYS HMI – kokpitový displej pre lietadlo

- **Validácia** – Zabezpečuje optimalizáciu a validáciu digitálneho dvojčaťa. V kroku validácie je možné využiť:
 - XiL testovanie – „X-in-the-Loop“ je metóda testovania, kde X predstavuje testovanú jednotku, ktorá môže byť model (MiL), softvér (SiL) alebo hardvér (HiL). Pričom testovacie jednotky sa môžu navzájom kombinovať [5].



Obr. 15 XiL model

- Multi-doménové simulácie
- Rýchle HMI prototypovanie – HMI obrazovku dokážeme rýchlo vytvoriť, vďaka čomu je optimalizácia systému jednoduchšia a rýchlejšia (Obr. 16).



Obr. 16 ANSYS - HMI obrazovka

- **Nasadenie** – Finálny krok, ktorý predstavuje pripojenie a nasadenie digitálneho dvojčata k IIoT. Po nasadení digitálneho dvojčata dochádza k jeho optimalizácii, pričom optimalizované dvojča môžeme jednoducho exportovať a nasadiť v inej prevádzke. Pre pripojenie digitálneho dvojčata do systému potrebujeme konektor, ktorý zabezpečí prepojenie výrobného procesu a dvojčata z ANSYS-u. Konektor môže predstavovať platforma PTC ThingWorx, GE Predix a iné.



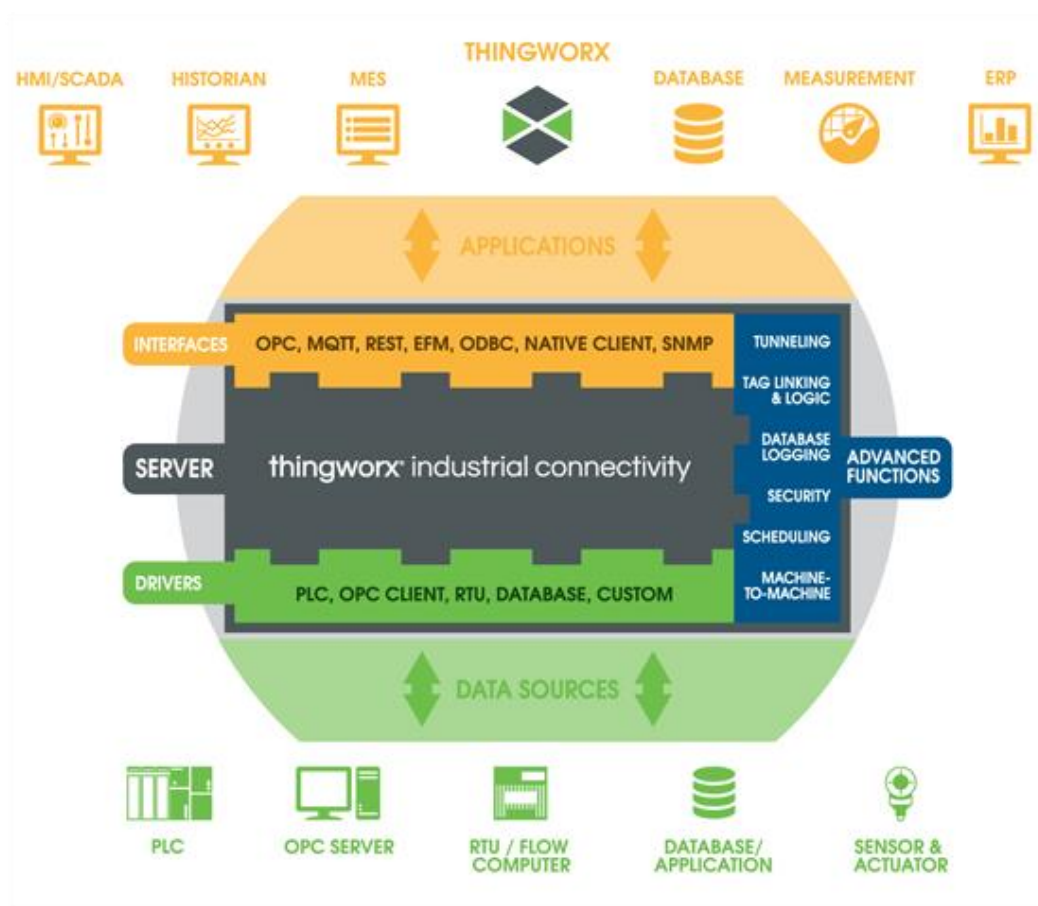
Obr. 17 ANSYS Twin Builder - technické možnosti

3 ANSYS & ThingWorx - digitálne dvojča čerpadla

V máji 2017 spoločnosť PTC a ANSYS predstavili riešenie, ktoré umožní prídanie inžinierskej simulačnej technológie ANSYS k aplikáciám postaveným na ThingWorx Industrial Internet of Things od spoločnosti PTC. Ako príklad prepojenia ANSYS a ThingWorx si zvolili čerpadlo, ktoré sa typicky využíva v závodoch.

Príklad čerpadla, ukazuje ako digitálne dvojča spracováva generované senzоровé dáta zo zariadenia a využíva simuláciu na predpovedanie porúch a diagnostiku neefektívnosti. Vďaka tomu spoločnosť môže podniknúť kroky na okamžitú nápravu problémov a optimalizáciu výkonu.

ThingWorx je platforma, ktorá slúži na vývoj a prepojenie inteligentných zariadení. Platforma prepája zariadenia z najnižších vrstiev (PLC, senzory, aktuátory a iné) so systémami, ako napríklad MES, ERP alebo HMI/SCADA (Obr. 18).



Obr. 18 ThingWorx – prepojenie nižších vrstiev so systémami

3.1 Návrh digitálneho dvojčat'a čerpadla

Nasledujúca kapitola sa venuje opisu návrhu a využitia digitálneho dvojčat'a čerpadla, pričom hlavnú úlohu zohrávajú produkty od spoločnosti ANSYS a PTC (Obr. 20).

Čerpadlo bolo vybavené snímačmi tlaku na vstupe a výstupe, prietokomermi a akcelerometrami. Akcelerometre slúžili na meranie vibrácií a boli umiestnené na čerpadle a ložiskách. Vypúšťací ventil bol ovládaný pomocou akčného člena a ventil na sacej strane bol ovládaný ručne. Snímače a akčné členy boli pripojené k zariadeniu na zhromažďovanie údajov, ktoré údaje odoberalo a odosielalo do zariadenia HPE GL20 (Obr. 19). HPE GL20 predstavovalo gateway a zabezpečovalo beh platformy ThingWorx, ktorá bola použitá ako brána medzi snímačmi a digitálnymi údajmi [6].

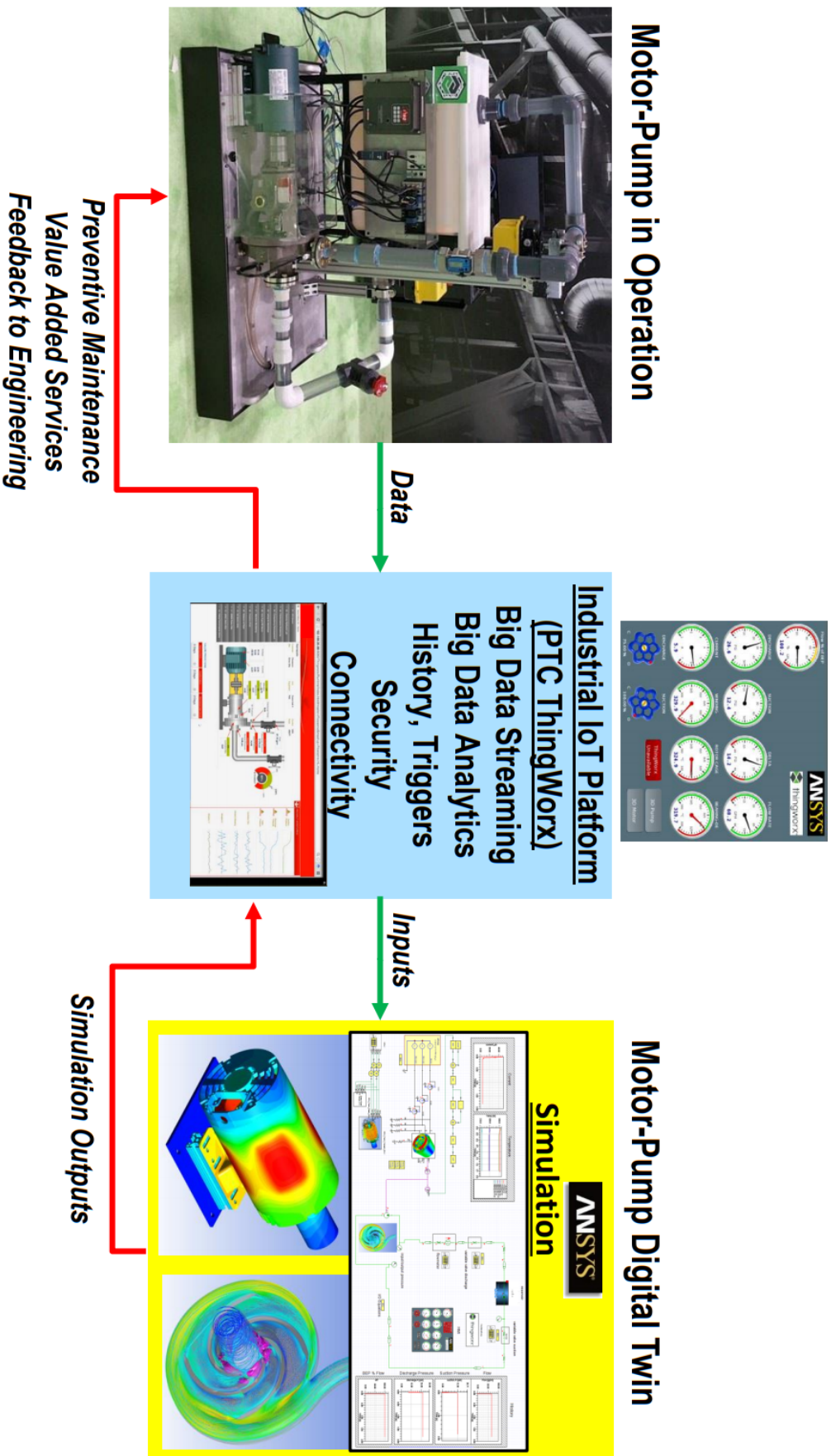
Platforma ThingWorx je schopná komunikovať so senzormi a akčnými členmi prostredníctvom protokol, ako napríklad DeviceNet, Modbus, EtherNet/IP, MQTT, ICMP a iné [7].

Strojové učenie v ThingWorx bežiacie na EL20 monitorovalo senzory a akčné členy. Automaticky sa učilo, aký by mal byť normálny stav čerpadla v prevádzke, identifikovalo prevádzkové anomálie a generovalo náhľady a predpovede.

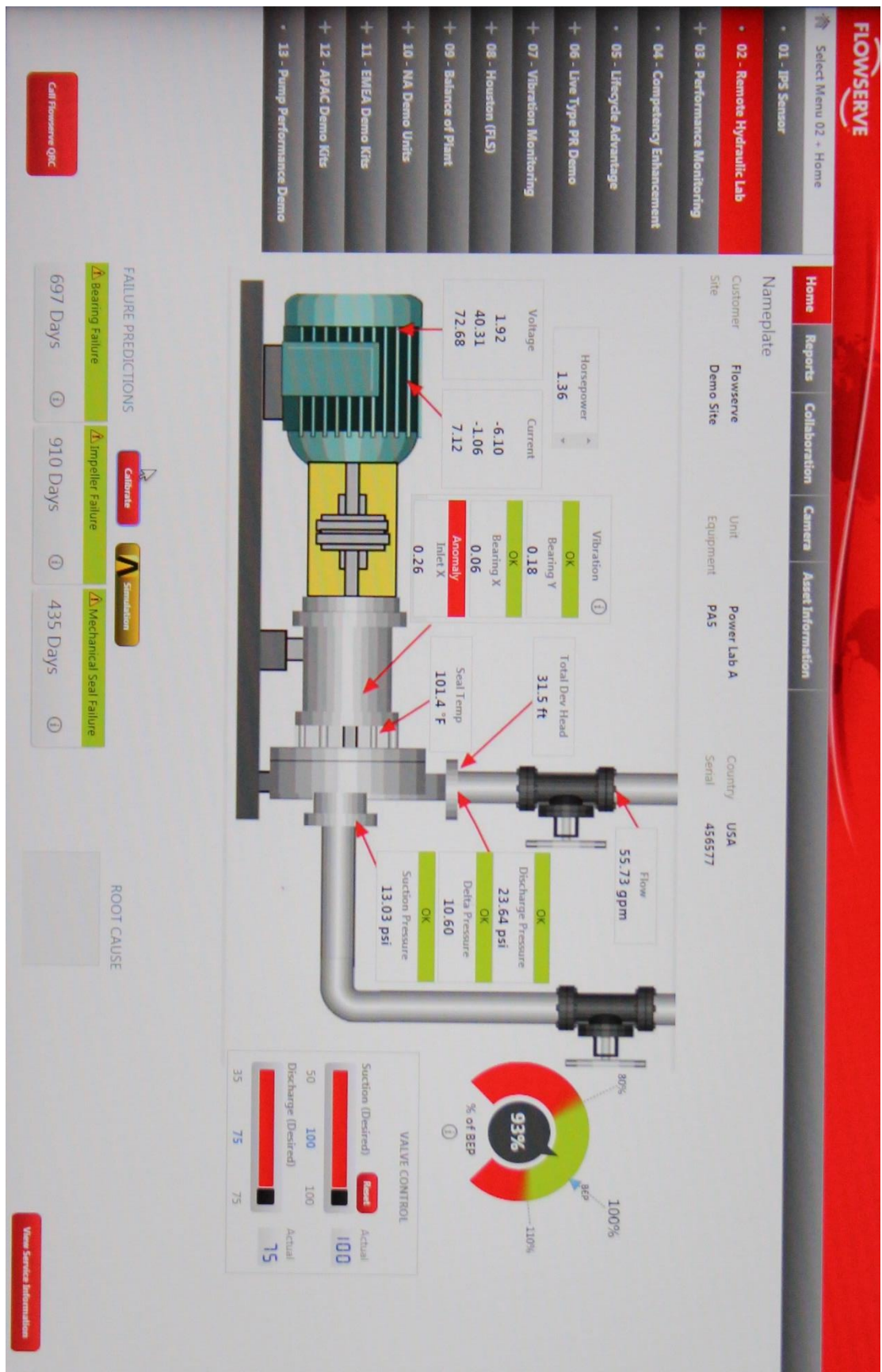


Obr. 19 HPE GL20 – gateway

Platforma ThingWorx bola tiež využitá na vytvorenie webovej aplikácie (Obr. 21), ktorá zobrazuje údaje zo sensorov a akčných členov, ako aj analytiku. Napríklad aplikácia zobrazuje vstupný - výstupný tlak a predpokladanú životnosť ložísk. ThingWorx ponúka možnosť využiť aj rozšírenú realitu (Obr. 22) prostredníctvom mobilného telefónu, tabletu alebo inteligentných okuliarov.



Obr. 20 Prepojenie čerpadla s digitálnym dvojčat'om pomocou ThingWorx



Obr. 21 ThingWorx – webová aplikácia čerpadla



Obr. 22 ThingWorx – virtuálna realita

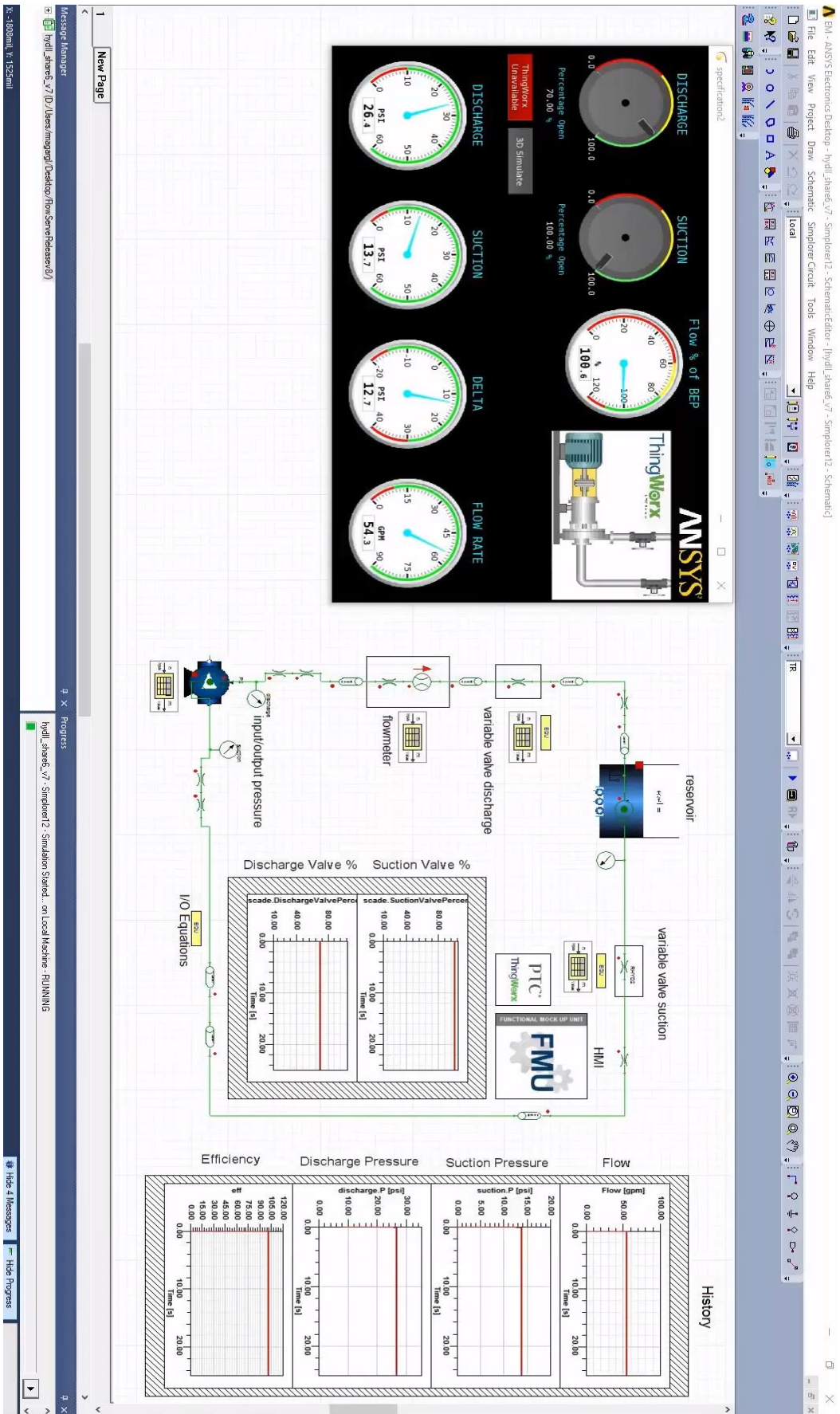
Tím ANSYS vytvoril model systému čerpadla pomocou ANSYS Digital Twin, ktorý bežal taktiež na zariadení HPE GL20. Systémový model čerpadla získaval údaje zo snímačov a akčných členov prostredníctvom technológie PTC ThingWorx a zároveň napodobňoval činnosť hydraulického systému. Systémový model čerpadla sa taktiež pripájal k rozhraniu človek-stroj (HMI), ktoré bolo vyvinuté pomocou softvéru ANSYS SCADE s rovnakými meradlami a číselníkmi ako fyzické čerpadlo (Obr. 23). Pri tejto konfigurácii mohol byť systémový model odpojený od fyzického čerpadla a prevádzkovaný offline, aby preskúmal navrhované prevádzkové scenáre. Systémový model by mohol byť taktiež vybavený virtuálnymi senzormi na meranie napríklad tlaku vpred a za ventilmi.

Spoločnosť ANSYS vyvinula aj podrobný trojrozmerný CFD model čerpadla, ktorý bežal v cloud-e, nakoľko cloud ponúkal dostatočný výkon na beh zložitejších simulácií. Model čerpadla v cloud-e získaval údaje buď z aktívneho bežiaceho systému alebo z offline modelu

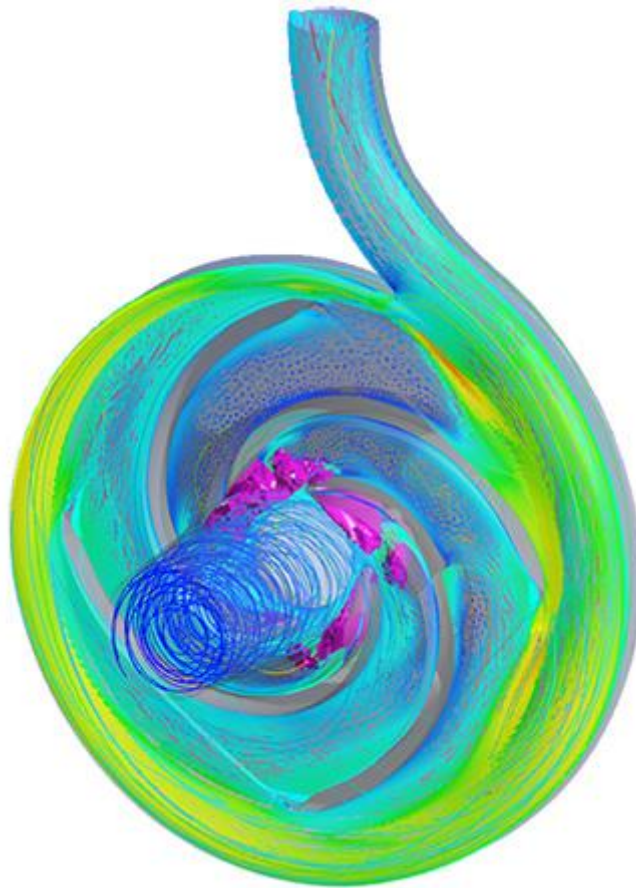
systemu. Model systému čerpadla umožňoval rýchle simulácie na úrovni systému a trojrozmerný model v cloud-e bol základom podrobnejšej diagnostiky systému čerpadla mimo prevádzky a hodnotenia výkonu v anomálnych podmienkach [6].

Aby sa preukázala hodnota digitálnej dvojčky, čerpadlo spočiatku fungovalo normálne. Manuálne bola zavedená anomália a to zatvorením sacieho ventilu na 50 percent. Z údajov zo snímača vyplývalo, že sací tlak, výstupný tlak a prietok sa drasticky znížili, zatiaľ čo akcelerometre vykazovali vysoké úrovne vibrácií. Prediktívna analýza ukázala, že predpokladaná životnosť čerpadla sa znížila na niekoľko dní, ak tento stav pretrváva. Avšak hodnoty zo senzorov a analýza nevysvetlili vplyv anomálnych podmienok prietoku na prevádzku čerpadla, prečo čerpadlo vibrovalo alebo aké možné riešenia problému by mohli existovať.

Systémový model čerpadla vykazoval rovnaké hodnoty na HMI obrazovke ako fyzické čerpadlo. Aby sme pochopili hlavnú príčinu vzniku vibrácií a aký bol efekt zmeny stavu prietoku pri prevádzke čerpadla, tak sa spustil 3D simulačný model čerpadla v cloud-e, ktorý bol pripojený k fyzickému čerpadlu. K spusteniu 3D simulácie došlo na základe kliknutia na tlačidlo „3D simulate“ na HMI obrazovke (Obr. 23). 3D simulácia ukázala, že pokles tlaku vo vnútri čerpadla spôsobil kavitáciu, čím sa vytvorili bublinky pary (Obr. 24). V oblastiach s vyšším tlakom bubliny zanikli prostredníctvom implózie a generovali vibrácie. Odpojením systémového modelu od fyzického čerpadla by sa mohol model s HMI obrazovkou použiť na vyskúšanie rôznych potenciálnych opráv. Systémový model napríklad predpovedal, že otvorenie sacieho ventilu by problém vyriešilo. Na overenie tejto potenciálnej opravy bola vykonaná druhá 3D simulácia na offline modeli systému s otvoreným ventilom. 3D výsledky simulácie nevykazovali žiadne bublinky pary. Oprava bola vykonaná otvorením sacieho ventilu na fyzickom čerpadle a výkon sa vrátil do normálu [6].



Obr. 23 ANSYS – Návrh čerpadla + HMI obrazovka



Obr. 24 3D simulačný model ukazuje, že kavitácia (vizualizovaná fialovými bublinami pary) je príčinou problému s vibráciami.

Záver

IoT umožňuje simulačným modelom pripojiť sa na reálne fyzické procesy. Spoločnosti môžu tieto digitálne dvojčatá použiť na detekciu a izoláciu porúch, na diagnostiku a odstraňovanie problémov, na určenie ideálneho plánu údržby na základe špecifikácií jednotlivých aktív, na optimalizáciu prevádzky a na vytváranie poznatkov, ktoré môžu zlepšiť budúcu generáciu produktu.

Koniec koncov, úspech digitálneho dvojčat'a bude pravdepodobne závisieť na schopnosti rozvíjať a udržiavať iniciatívu digitálneho dvojčat'a spôsobom, ktorý dokáže v priebehu času preukázať rastúcu hodnotu podniku. Na zabezpečenie takéhoto výsledku bude možno potrebné integrovať digitálne technológie a digitálne dvojčat'a do úplnej organizačnej štruktúry - od výskumu a vývoja až po predaj - neustále využívať poznatky z digitálneho dvojčat'a, aby zmenili spôsob podnikania, rozhodovania a vytvárali nové príjmové toky.

Možností prepojenia digitálneho dvojčat'a od spoločnosti ANSYS a fyzického procesu výroby nie je momentálne mnoho. Riešenie v spolupráci s ThingWorx bolo predstavené len nedávno, a to minulý rok. Smer pre budúci výskum a štúdium vidím v možnostiach ako získať údaje z výroby, zabaliť ich do správneho dátového formátu, využiť v softvéri ANSYS a následne zapracovať získané poznatky späť vo výrobe.

Zdroje

- [1] PARROTT, A. – WARSHAW, L. 2017. (*Industry 4.0 and the digital twin*). [on-line]. [cit: 2018-08-10]. Dostupné na < <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/cip/deloitte-cn-cip-industry-4-0-digital-twin-technology-en-171215.pdf> >
- [2] ANSYS Products. [on-line]. [cit: 2018-15-10]. Dostupné na: <<https://www.ansys.com/products>>
- [3] MENTER, F. 2011. (*Turbulence Modeling for Engineering Flows*). [on-line]. [cit: 2018-13-10]. Dostupné na <<http://www.izeninc.com/wp-content/uploads/2015/10/tp-turbulence-modeling-for-engineering-flows.pdf>>
- [4] ANSYS Twin Builder. [on-line]. [cit: 2018-14-10]. Dostupné na: <<https://www.ansys.com/products/systems/ansys-twin-builder>>
- [5] GAO, H. – ZHANG, H. – CHEN, H. – ZHAO, Z. – SONG, K. 2018. (*Application of the X-in-the-Loop Testing Method in the FCV Hybrid Degree Test*). [on-line]. [cit: 2018-16-10]. Dostupné na <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/433/pdf>>
- [6] Creating a Digital Twin for a Pump. [on-line]. [cit: 2018-15-10]. Dostupné na: < <https://www.ansys.com/about-ansys/advantage-magazine/volume-xi-issue-1-2017/creating-a-digital-twin-for-a-pump> >
- [7] KEPServerEX Product. [on-line]. [cit: 2018-14-10]. Dostupné na: < <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/product-search> >