

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA

Model-based design v návrhu řídicích systémů elektrických pohonů a střídačů
připojených k elektrizační síti



RICE

Jakub Talla

RESEARCH AND INNOVATION CENTRE FOR ELECTRICAL ENGINEERING

RICE

Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering,
R&D centre of FEL UWB

260+

researchers

120+

industrial partners
worldwide



Research

original idea → design → functional
samples → complete testing

15 mil. €

annual turnover



KLÍČOVÉ KOMPETENCE

- Materiály
- Výkonová elektronika & polovodiče
- Elektrické stroje, pohony a mechatronika
- Energetika
- Elektronika a vestavné systémy
- Průmyslová informatika / AI
- Výpočetní inženýrství
- Diagnostika a testování

Výkonová elektronika, elektrické pohony a stroje

Součástky výkonové elektroniky

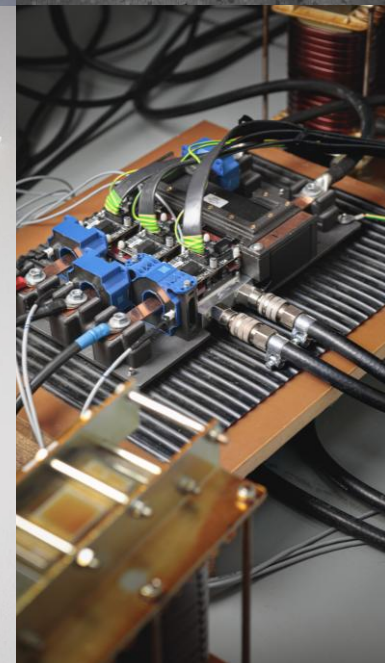
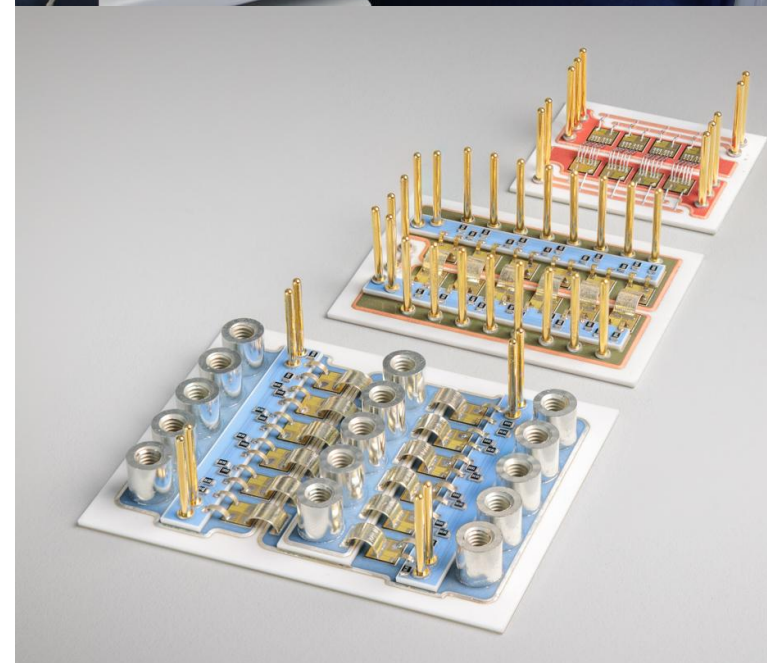
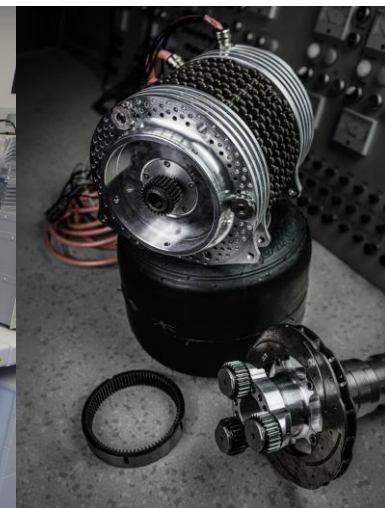
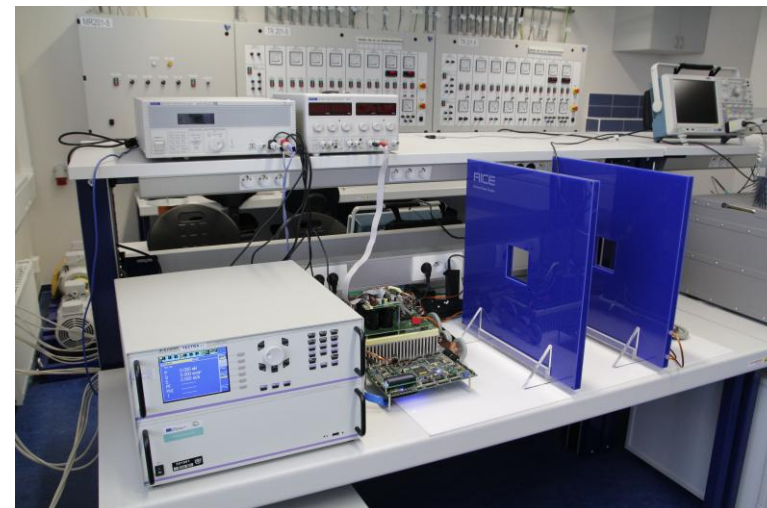
- Měniče se širokopásmovými polovodiči - charakterizace, kvalifikace a optimalizace

Výkonové elektronické měniče

- Nové topologie, návrh a chlazení
- Měniče s vysokou hustotou výkonu
- Návrh vlastních modulů

Elektrické pohony a mechatronické systémy

- Nové koncepty elektrických pohonů
- Řízení, včetně HW, SW a algoritmů
- **Bezdrátový přenos energie**



Elektromobilita

Hlavní aplikační oblasti - silniční, kolejová, vodní, letecká

- Koncepty a kompletní návrhy pohonů
- Inteligentní pohony a dopravní prostředky
- Energetický management
- Speciální pohony a pohony pro motosport

Napájecí a nabíjecí technika

- Trakční stanice
- Nabíjecí stanice
- Interakce s distribuční sítí

Vybrané reference

- Městské tramvaje, trolejbusy, hybridní a elektrické autobusy, lokomotivy



• SKODA.CZ

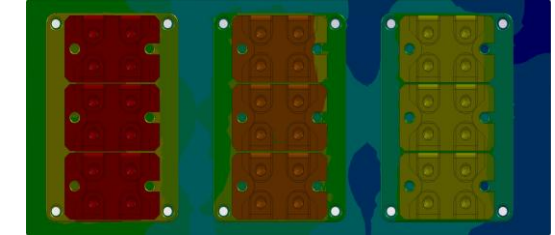
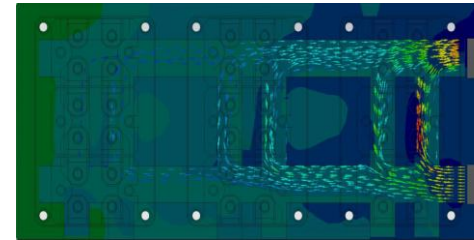
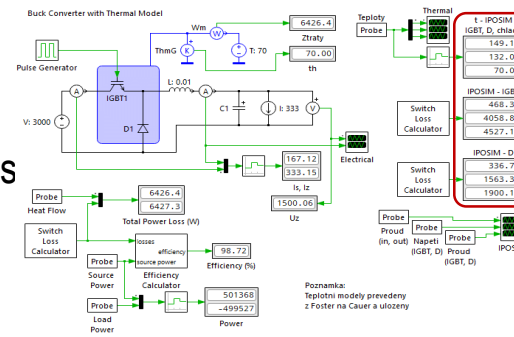
• SKODA.CZ

• SKODA.CZ

NÁVRH MĚNIČŮ, MODELOVÁNÍ, PROTOTYPOVÁNÍ, TESTOVÁNÍ

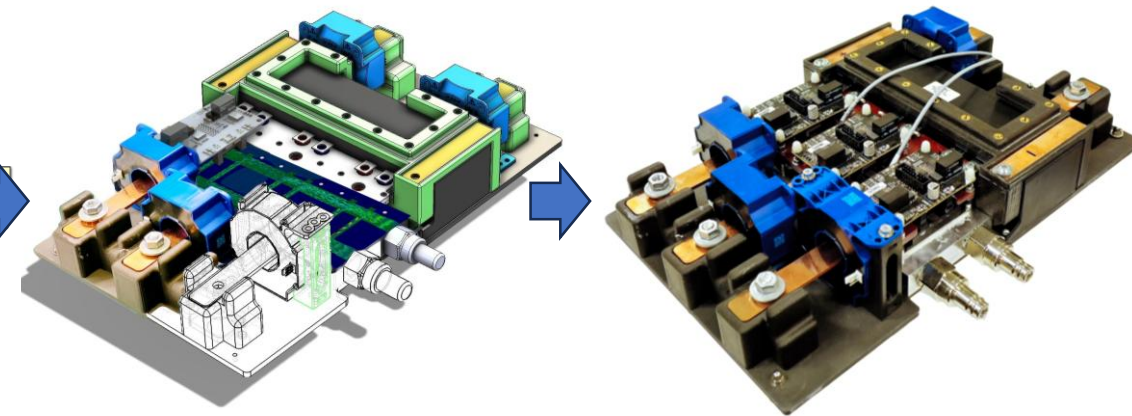
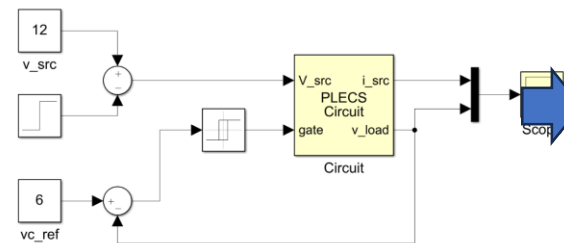
Nástroje na modelování a návrh

- MATLAB/Simulink + PLECS
- ANSYS, Comsol Multiphysics, SolidWorks
- AltiumDesigner
- C++ a Python proprietární nástroje



Hlavní kompetence

- Parametrický návrh a optimalizace
- Multiphysics FEM
- Modely v časové oblasti
- Výpočet ztrát a oteplení
- Modely pro MIL, PIL and HIL



XM3 250kW 3-phase converter

Návrh a konstrukce výkonových měničů



SHRack, 4x5kW H-bridge rack mounted converter



12 phase 80kW inverter for student e-Formula



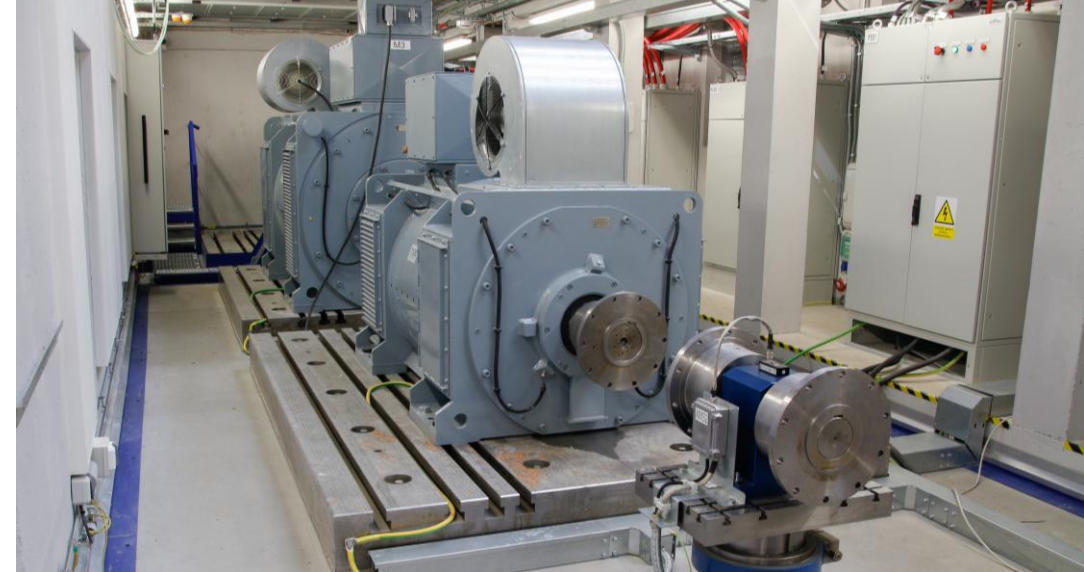
Air cooled 400V @ 1125A 1.35MVA six phase converter for ground faults compensation

Halová laboratoř výkonové elektroniky RICE

- Testování zařízení až do **4 MW**
- Ztráty až **500 kW** (chlazení)
- Testovací jáma pro velké trakční pohony
- Vysokorychlostní DAQ (50 μ s sampling rate)
- IR kamery
- High-tech měřící instrumentace

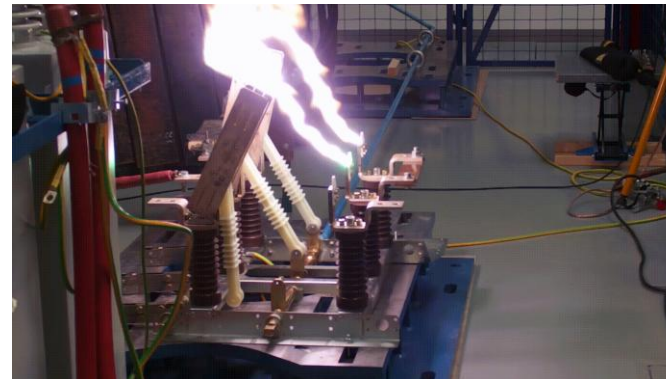
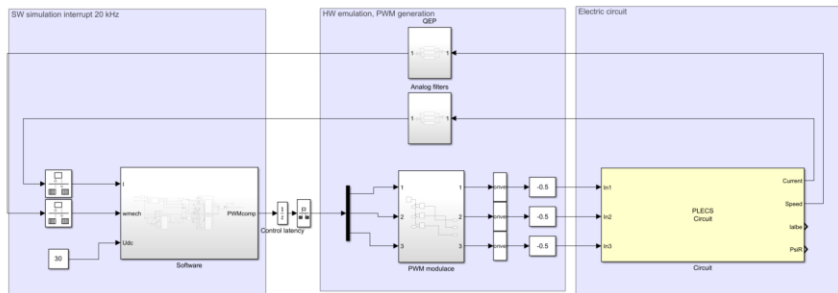
Napájení trakčních systémů:

- **AC 25 kV / 50 / 60 Hz (0 – 31.5 kV; 45 – 65 Hz),**
- **AC 15 kV / 16.7 Hz (0 – 19 kV; proměnná frekvence od 15 Hz),**
- DC 600 V, 750 V, max. napětí do 1 250 V (i.e. 0 – 1 250 V),
- **DC 1.5 kV and 3 kV, max. napětí až 5.5 kV (i.e. 0 – 5.5 kV).**



Hlavní etapy vývoje pohonů a výkonové elektroniky

Simulace (HIL) + Prototyp malého výkonu / Prototyp velkého výkonu testování / Prototyp velkého výkonu instalace

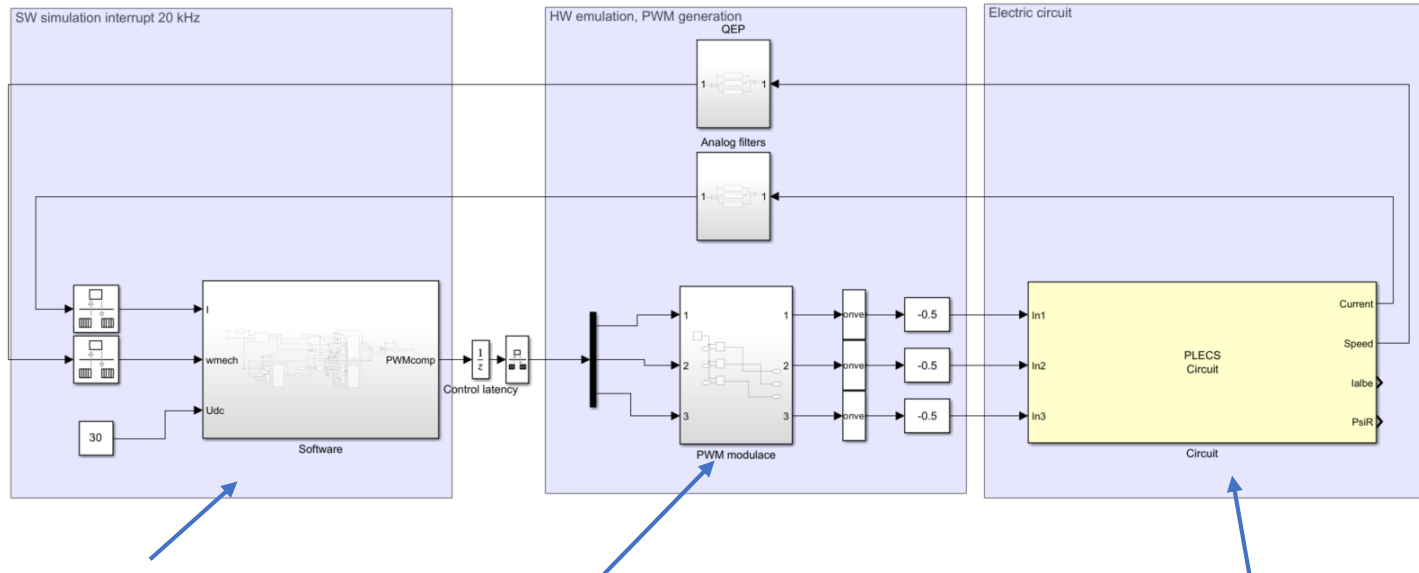


Zemní spojení 22kV



Zemní spojení 22kV

Simulace a modelování měničů a elektrických pohonů



Řízení/SW a modelování HW v Simulink/
Simulink + C / Simulink + Stateflow

Modelování elektrických obvodů (měničů
pohonů apod.)
Simulink + PLECS

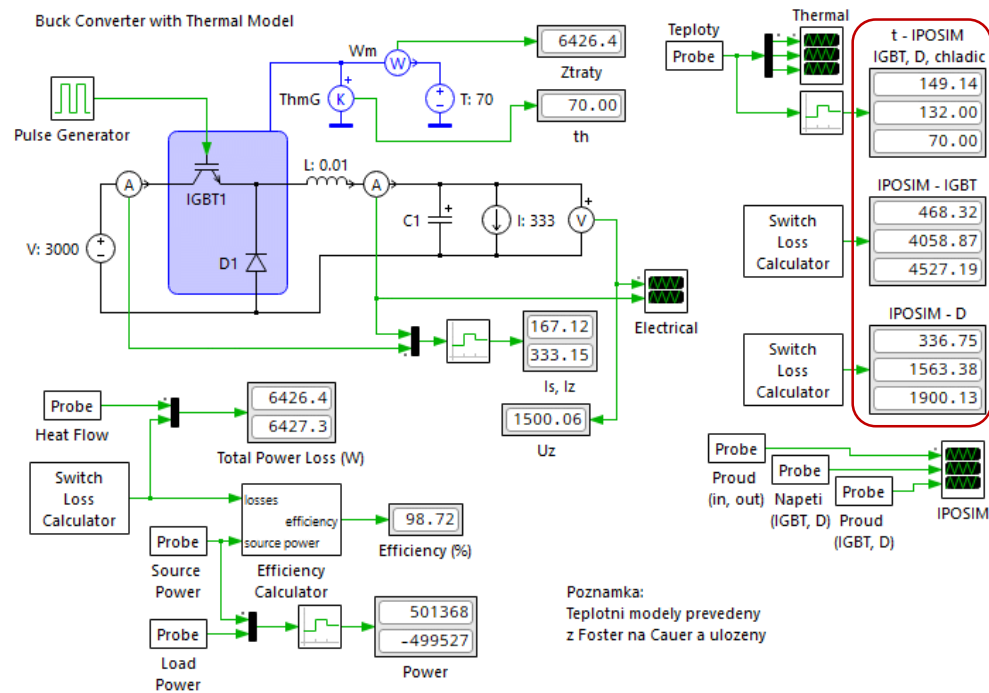
Využívání proprietárních C/C++ knihoven řízení
(FOC, DTC, FCS-MPC, Kalmanovy filtry, MRAS,...)

Simulink + PLECS

Modelování elektrických obvodů – PLECS (toolbox do Simulinku firmy PLEXIM)

- Návrh měničů, teplotní modely, chlazení...

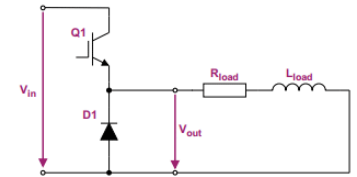
Simulink + PLECS



Infineon IPOSIM

Circuit & Control

Input Voltage V_{in}	3000 V
Output Voltage V_{out}	1500 V
Duty Cycle	0.5
Load Resistance	4.5 Ω
Load Inductance	0.01 H
Switching Frequency	1000 Hz



Chopper

SWITCH

FZ750R65KE3

IGBT parameters

$V_{CESat,0^\circ C}$	3.70 V
$E_{on} + E_{off,0^\circ C}$	10700.00 mWs
R_{thJC}	0.01 K/W
R_{thCH}	0.01 K/W
T_{vjmax}	125.00 $^\circ C$

Diode Parameters

$V_{F,0^\circ C}$	2.95 V
$E_{rec,0^\circ C}$	3000.00 mWs
R_{thJC}	0.02 K/W
R_{thCH}	0.01 K/W
T_{vjmax}	125.00 $^\circ C$

Gate driver

Switch Q1: R_{Gon}	1.00 Ω
Switch Q1: R_{Goff}	6.80 Ω

Cooling Conditions

Heatsink model	Fixed Heatsink
Temperature	
Heatsink temperature T_h	70.00 $^\circ C$

IGBT	149.34 $^\circ C$	4065.04 W	469.51 W	4534.55 W
DIODE	132.01 $^\circ C$	1565 W	336.56 W	1901.56 W
	MAXIMUM JUNCTION TEMPERATURE	SWITCHING LOSSES	CONDUCTION LOSSES	TOTAL LOSSES

Modelování střídačů/měničů -

Střídač jako ideální zdroj proudu

- Velice rychlá simulace, dlouhé kroky, vhodné pro rozsáhlé elektrické sítě
- Vhodná pro testování např. síťových kódů (grid codes) Q/U křivky, P/f....

Střídač jako ideální zdroj napětí + výstupní filtr, řízení (proud, synchronizace)

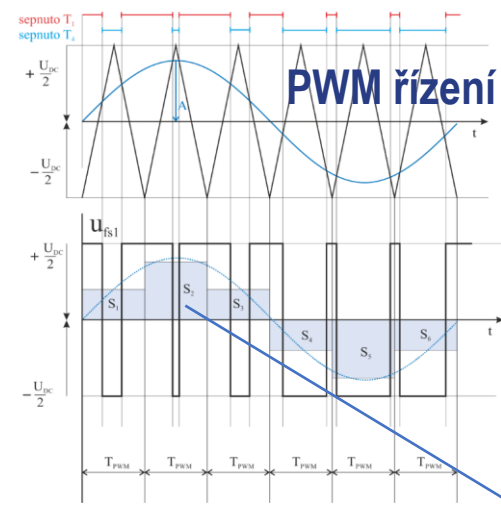
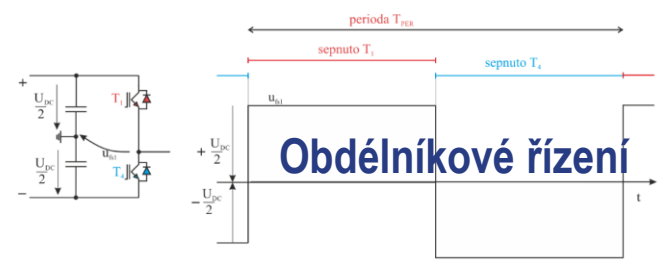
- Středně rychlá simulace, (krok simulace dán zpravidla časovými konstantami, menší počet zero-crossing událostí v porovnání s PWM)
- Vhodné pro testování základních algoritmů řízení

Střídač s PWM modulací + reálné chování prvků (mrtvé časy, úbytky na tranzistorech...)

- Zpravidla pomalá simulace, velký počet zero-crossing událostí
- Vhodné pro dimenzaci střídačů, vývoj algoritmů kompenzující nelinearity měničů – především vlivu mrtvých časů apod.

PWM řízené střídače

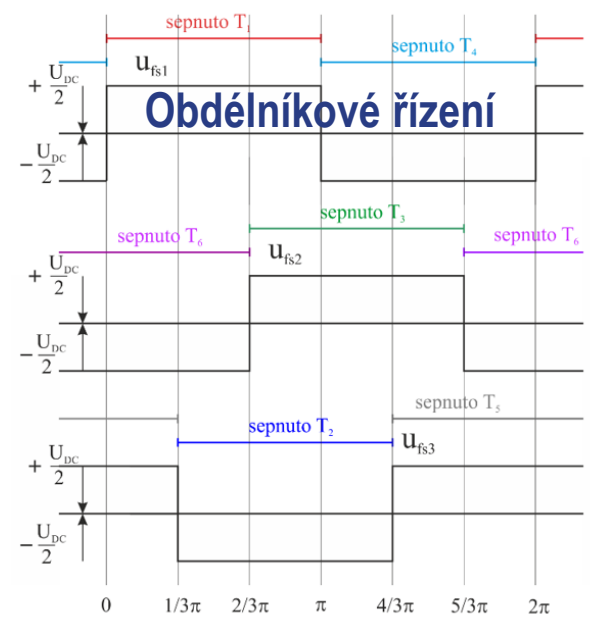
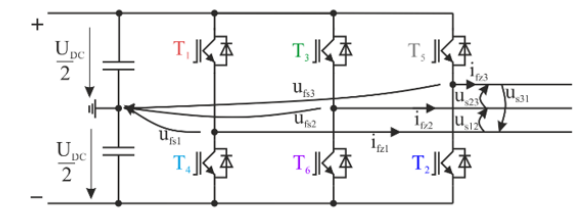
1 větev střídače, výstupní napětí



Nižší obsah harmonických

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$$

3 fázový střídač při obdéníkovém řízení



Posunutí o 120°

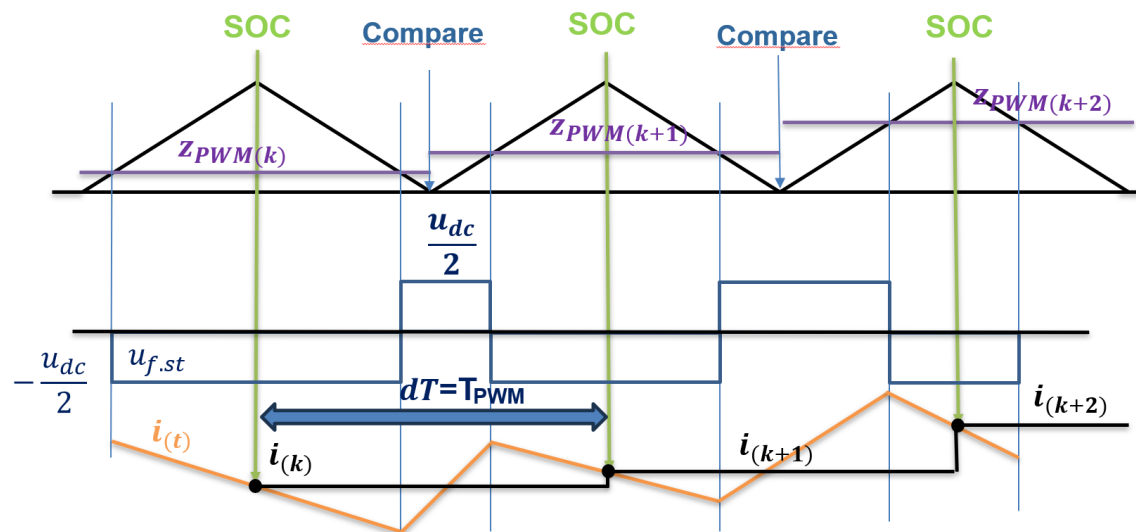


PWM řízené střídače, synchronizace vzorkování proudu

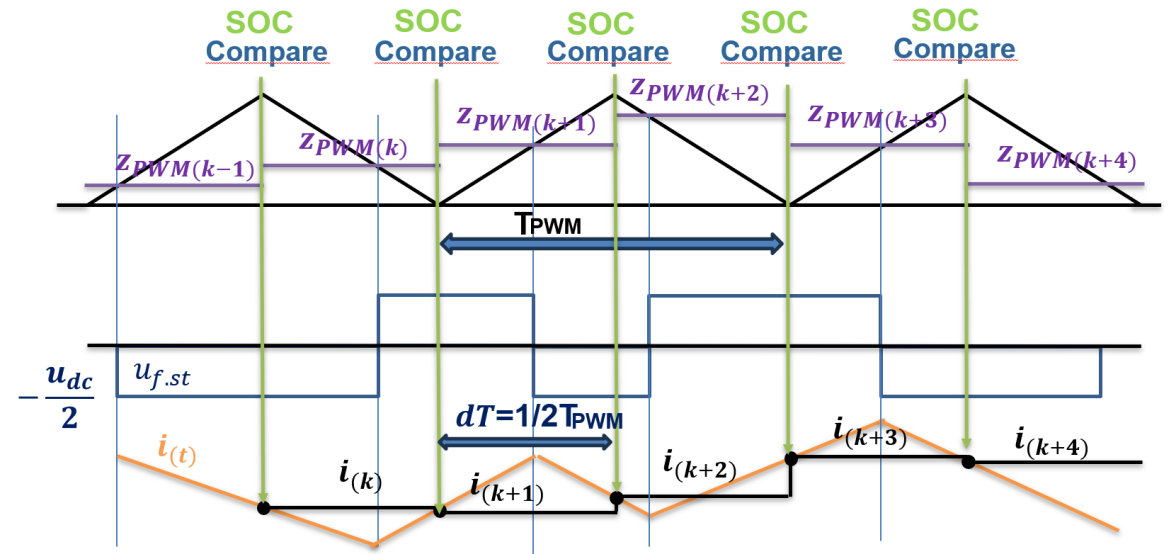
Synchronizace vzorkování a PWM pomáhá redukovat vliv zvlňení proudu na řízení + minimalizace vlivu komutace tranzistorů s okamžikem vzorkování (EMC)

Synchronizace ADC s pilou PWM

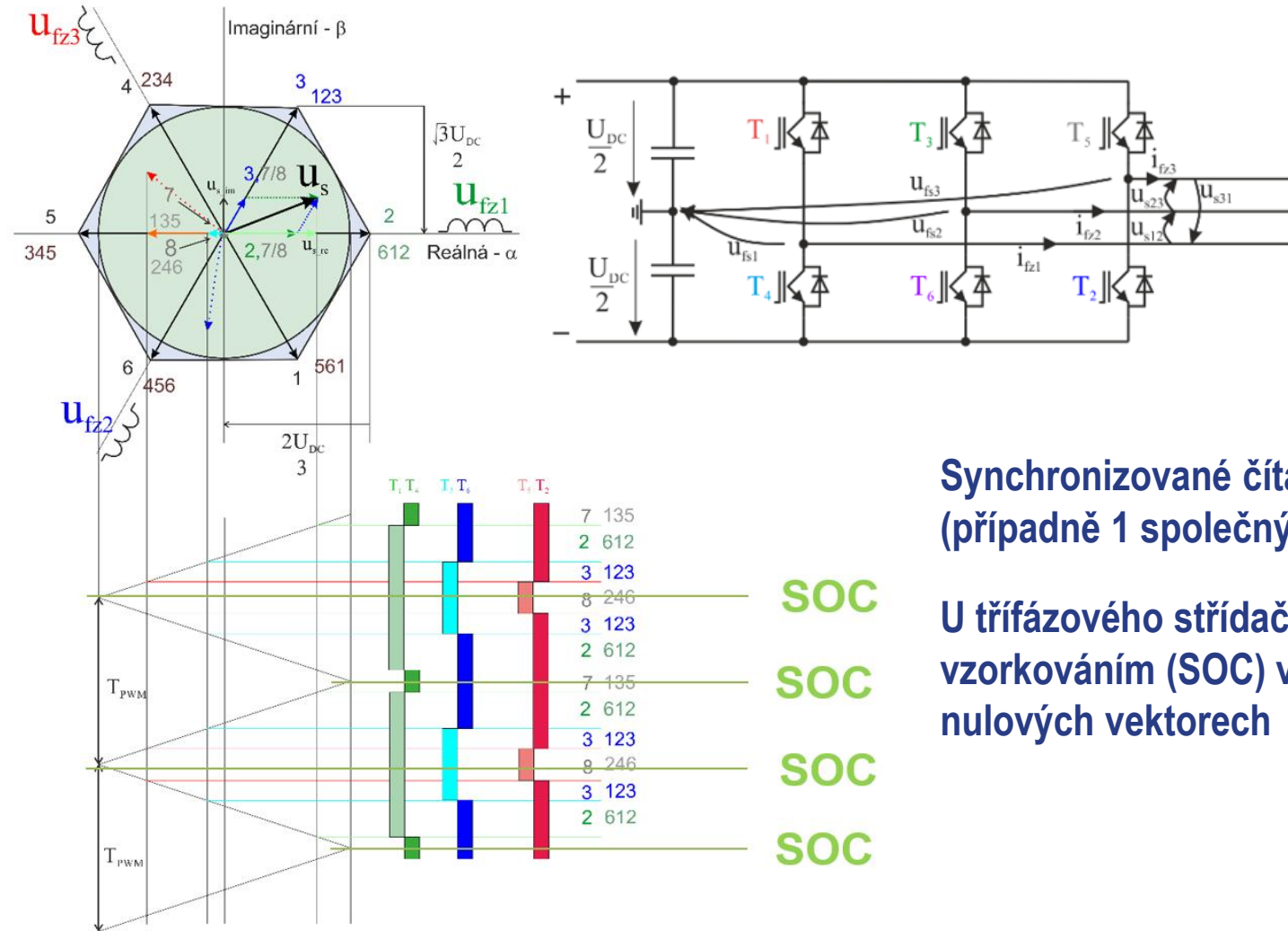
SOC=Start Of Conversion v topu překlápění ze shadow compare do compare v bottomu



SOC=Start Of Conversion v topu i bottomu, překlápění ze shadow do compare v topu i bottomu



Synchronizace vzorkování proudu u 3fázového střídače



Synchronizované čítače PWM
(případně 1 společný)

SOC

U třífázového střídače dochází ke vzorkování (SOC) v tzv. nulových vektorech

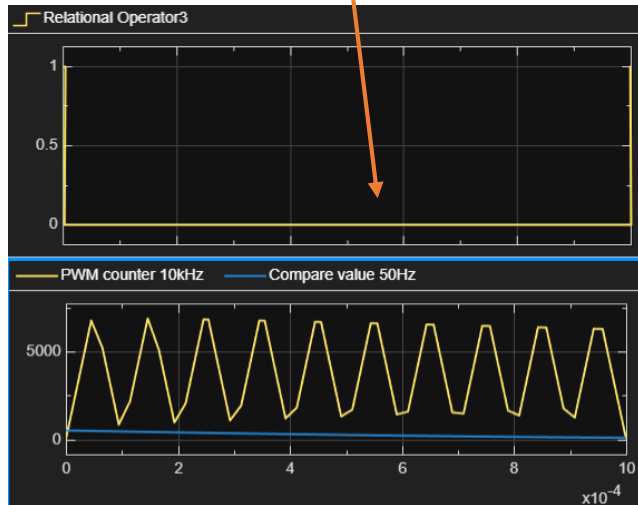
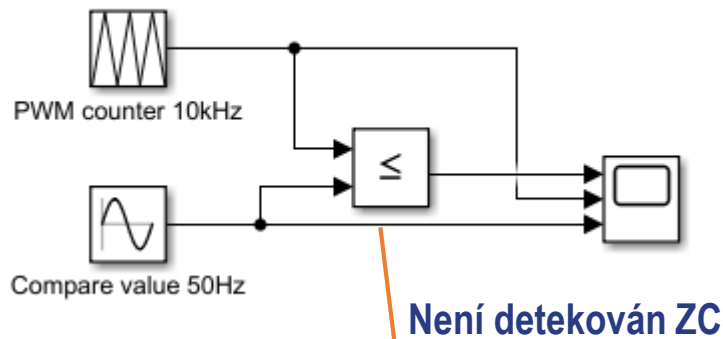
SOC

SOC

SOC

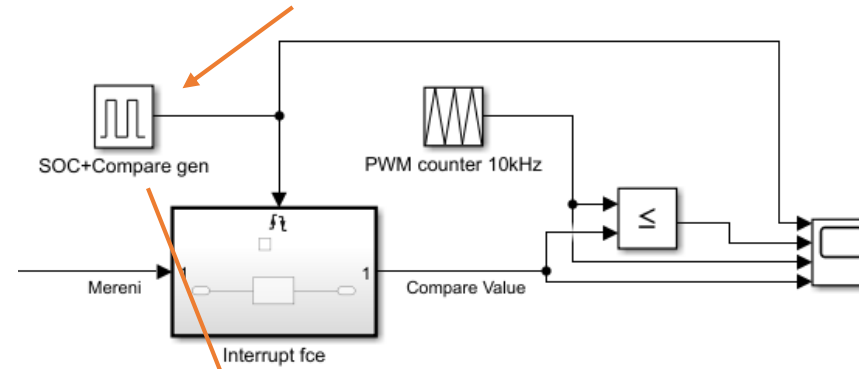
PWM řízené střídače - problematika modelování PWM

Generování PWM jako komparace pily + spojitý solver

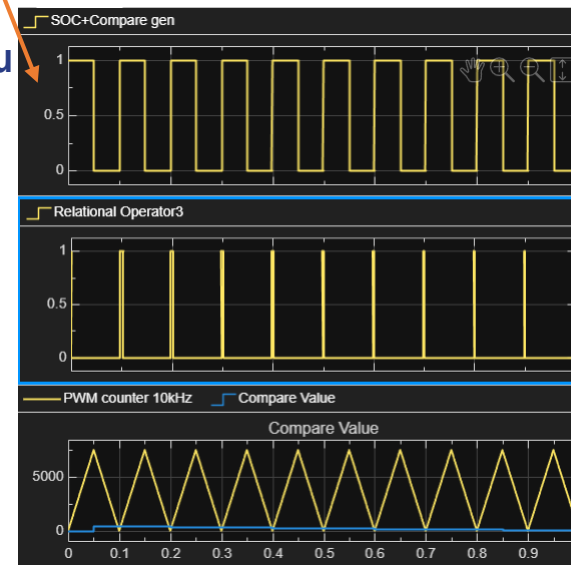


Není detekován ZC

Emulace Start Of Conversion



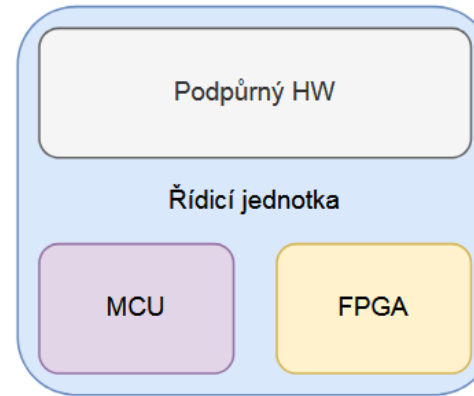
Vynutí krok simulace v okamžiky topu a bottomu pily



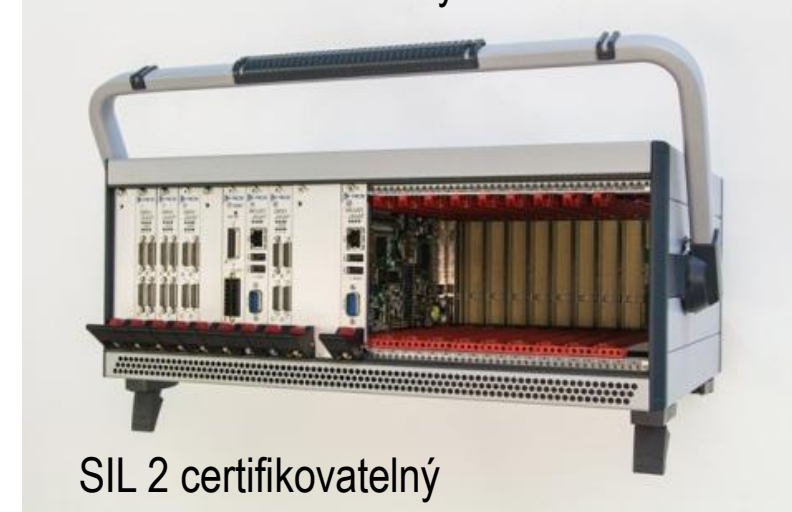
ŘÍDICÍ SYSTÉMY EL. POHONŮ A STRÍDAČŮ

NEJČASTĚJŠÍ KONCEPCE HW

- MCU Texas Instrument C2000 + FPGA Intel/Altera
- Vysoká míra flexibility pro vývoj a výzkum
- HW akcelerace výpočtů v FPGA
- Oproti SOCs jednoduché programování (bez FPGA)
- Vyšší cena, úžší hrdlo FPGA – MCU komunikace



Texas Instrument + Cyclone V SoC



SIL 2 certifikovatelný



Texas Instrument C2000 + Cyclone III FPGA

FEE UWB | RICE fel.zcu.cz

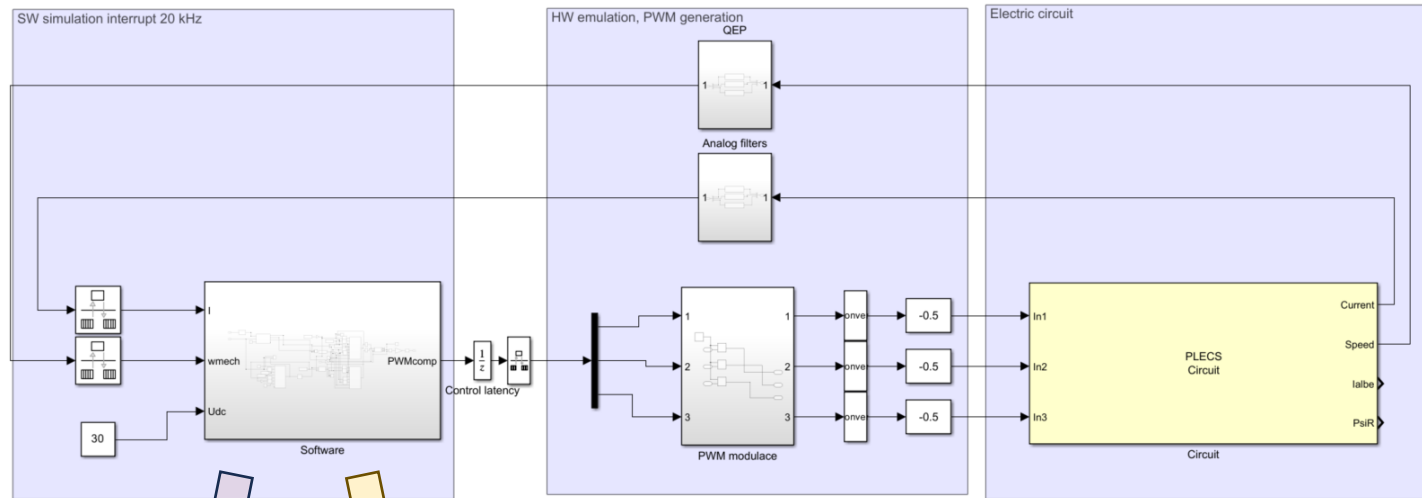


Texas Instrument C2000 + Cyclone FPGA

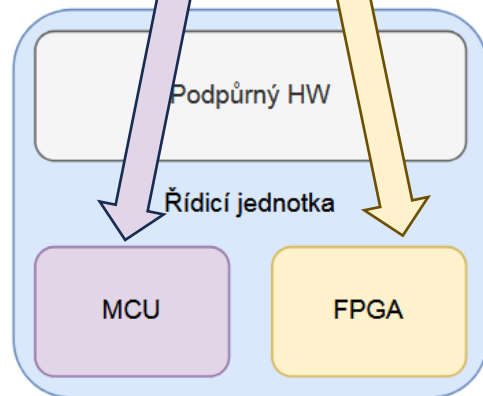


Texas Instrument C2000 + Cyclone FPGA

Automatické generování kódů pro řídicí systémy s TIC2000+Cyclone III



Automatické generování C kódu
(Embedded coder + C2000 Microcontroller blockset)

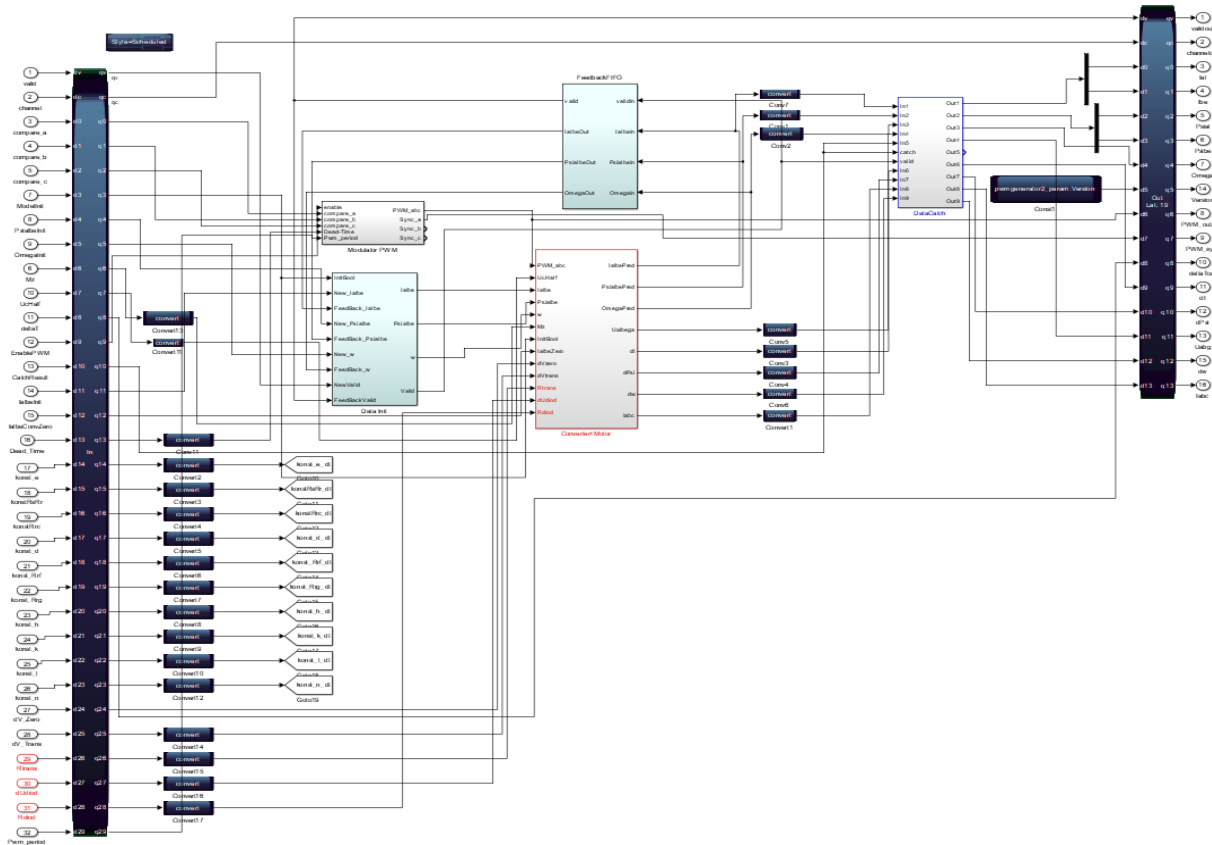


Automatické generování VHDL kódu pomocí Altera/Intel DSP Builder Advanced Blockset

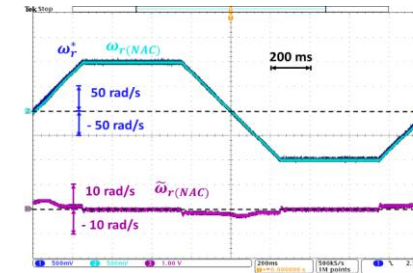
- 1) Transformace algoritmů s použitím DSP Builder bloků do pevné řádové čárky,
- 2) Kosimulace s klasickým modelem v plovoucí řádové čárce
- 3) Generování VHDL kódu + import do VHDL projektu

Automatické generování VHDL kódu pomocí Altera/Intel DSP Builder Advanced Blockset

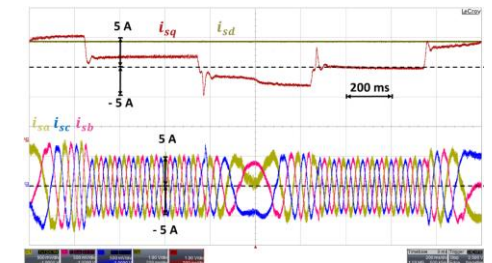
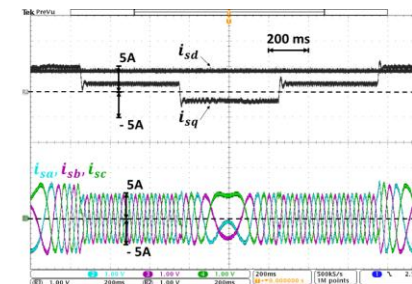
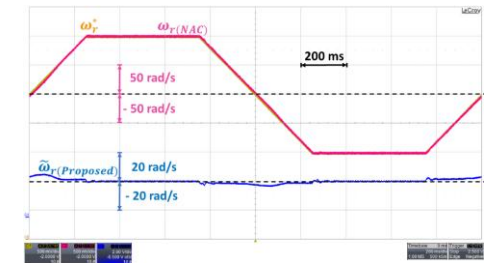
- Automatická pipeline, jednoduchá paralelizace
- Řízení délky slov fixed-point z .m skriptu, automatické škálování, generování C interface funkcí
- Vysoce efektivní kód (výpočet ASM + střídač) cca 200ns krok (Cyclone III)



HIL FPGA



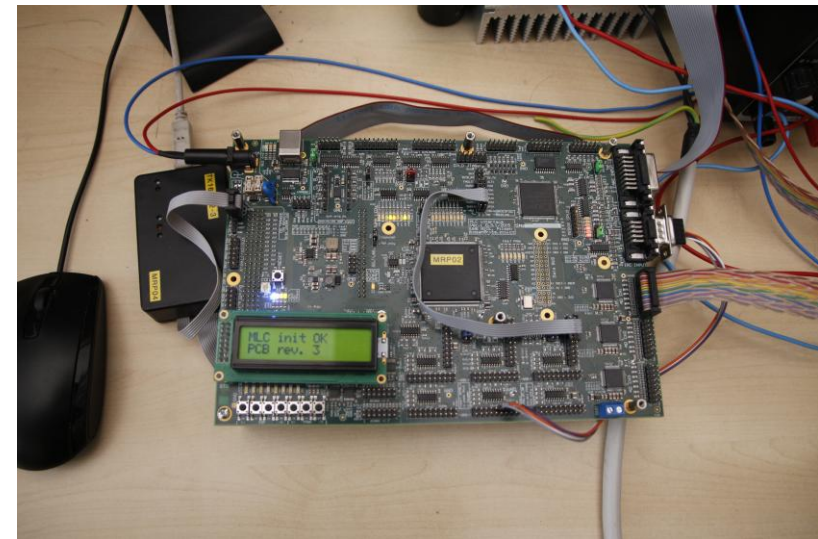
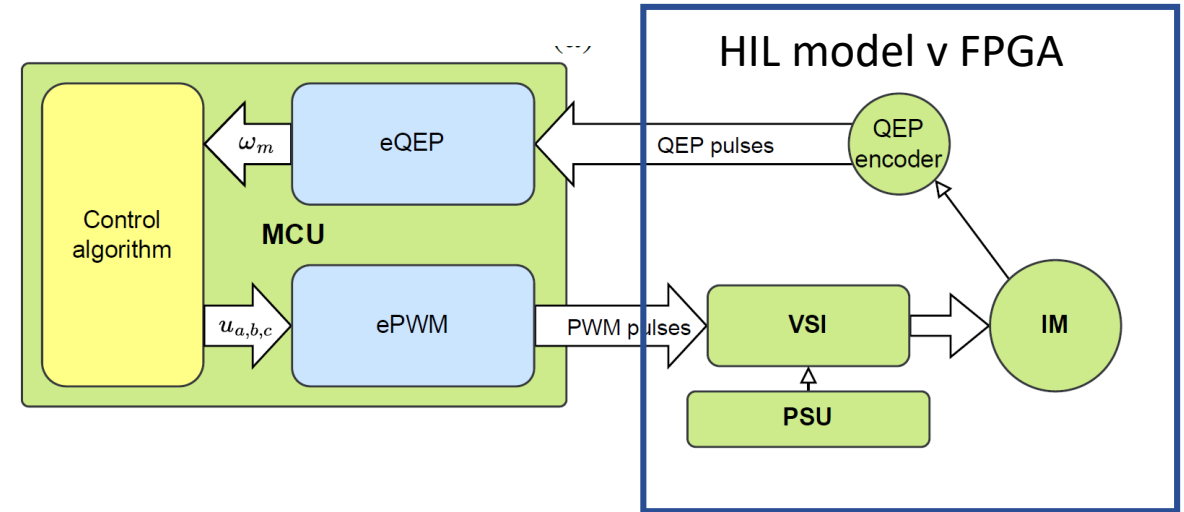
Experiment



Testování adaptivního regulátoru

Vzdálená laboratoř pro výuku programování el. pohonů v době covidu

- Studenti přes vzdálenou plochu programovali TI C2000 v prostředí Code Composer studio
- Konfigurace reálných periférií mikroprocesoru
- Pro účely diagnostiky využívaly SW osciloskop (aplikaci pro zobrazení interních proudů motoru HIL modelu apod.), komunikace s PC přes SCI



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

University of West Bohemia
Faculty of Electrical Engineering | RICE

t: +420 377 634 000

e: fel@fel.zcu.cz

a: Univerzitni 26, 306 14 Pilsen, Czech Republic

w: fel.zcu.cz



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA
IN PILSEN

RICE

