



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



**Rozvoj lidských zdrojů TUL pro zvyšování relevance,
kvality a přístupu ke vzdělání v podmínkách Průmyslu 4.0**

CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002329

EMC a vysokofrekvenční technika

Elektromagnetická kompatibilita

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
www.tul.cz



Elektromagnetická kompatibilita - EMC



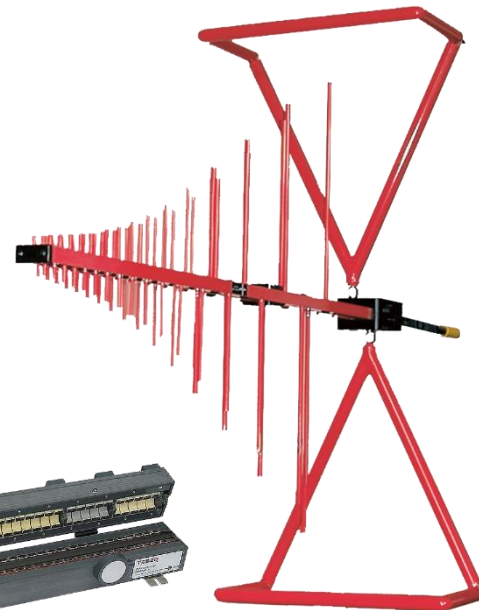
Přednášející:

Ing. Lubomír Slavík Ph.D.

Cvičící:

Ing. Lubomír Slavík Ph.D.

Ing. Petr Bílek, Ph.D.



Obsah předmětu

- Elektromagnetická kompatibilita – základní pojmy
- Zdroje rušivých signálů
- Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů
- Měření rušivých signálů (EMI)
- Elektromagnetická odolnost (EMS)
- Normalizace v oblasti EMC
- Způsoby omezování rušení

Literatura

- DŘÍNOVSKÝ, Jiří: *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. ISBN 978-80-214-4202-3.
- SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: přednášky*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. ISBN 80-214-2864-3.
- ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006. ISBN 0-471-75500-1.
- KAISER, Kenneth L. *Electromagnetic compatibility handbook*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-2087-9.

Obsah přednášky

- definice pojmu EMC
- historie EMC
- příklady nedodržení EMC
- rozdělení EMC
- legislativa EMC
- EMC ve vojenství
- EMC v automobilovém průmyslu
- základní pojmy EMC

Elektromagnetická kompatibilita

je schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé),

a současně svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. neprodukovat signály, jež by byly nepřípustně rušivé pro jiná zařízení (technická či biologická).

- **ElectroMagnetic Compatibility – EMC**
- **ElektroMagnetische Verträglichkeit – EMV**
- **ЭлектроМагнитная Совместимость – ЭМС**

Důvody respektování EMC

- elektronika téměř ve všech zařízeních
- široké spektrum elektromagnetických signálů 0 – stovky GHz
- souběh signálů s velmi různým výkonem (poměr až 10^{20})
- vysoká pravděpodobnost vzájemného rušení

H. M. Schlicke (1968)

- systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní.
- **Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita** jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností.

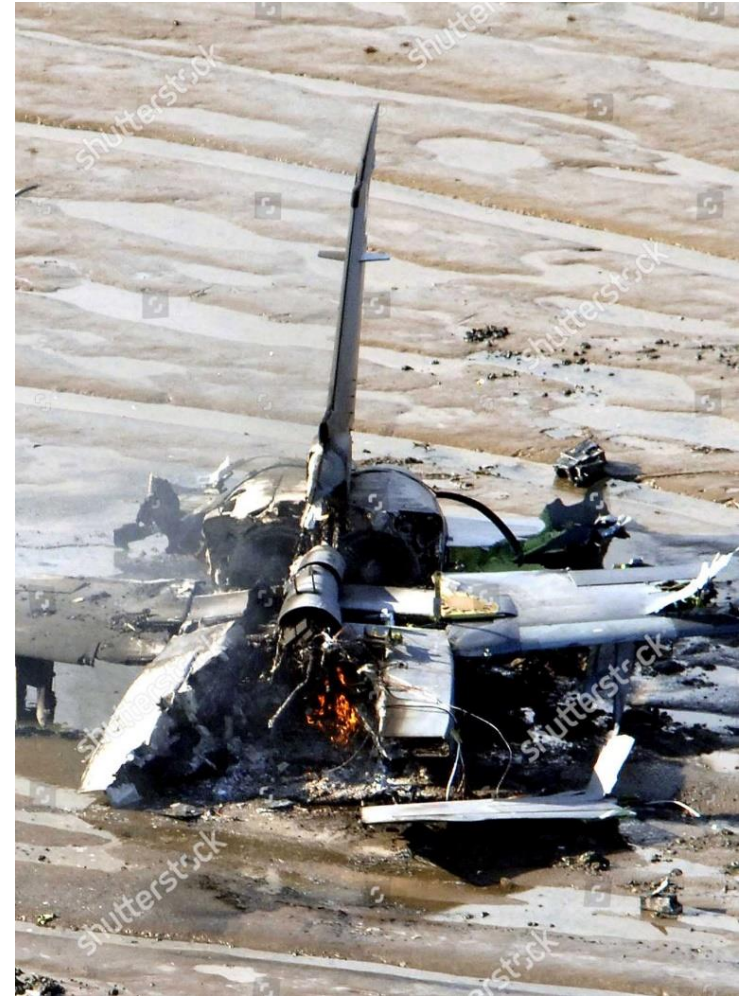
Příklady nedodržení EMC

- letecká neštěstí
 - interference pozemních EM signálů a řídicích signálů v letadle
 - vliv bouřek
 - interference EM polí Země a vesmírného prostoru



Zničení stíhacího letounu Tornado v roce 1984

- příčina – EM rušení od vysílače
- škoda 100 mil. DM (cca EUR)
- havárie u Mnichova



Potopení britského křižníku Sheffield v r. 1982

- příčina – EM rušení mezi komunikačním zařízením a protiletadlovým obranným systémem
- selhání protiletadlového systému – zásah argentinskou raketou Exocet – bitva o Falklandy
- škoda v mld liber, 20 úmrtí



Havárie rakety Persching II v Německu

- příčina – elektrostatický výboj
- raketa neúmyslně odpálena

Havárie v hutích v USA v r. 1983

- příčina – zarušení řízení jeřábu ruční vysílačkou
- předčasné vylití roztaveného kovu

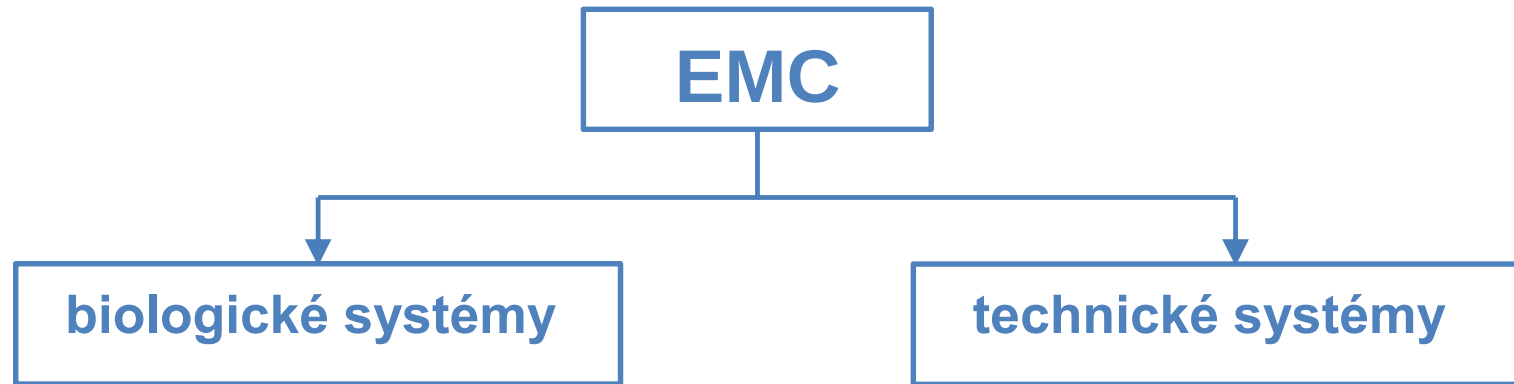
Vyřazení systému přenosu dat ve stanici SpaceLab

- příčina – použití vysavače bez certifikátu EMC

Havárie v českém prostředí

- **havárie v cukrovaru Mělník** – tyristorové měniče zarušily samy sebe!
- **Labská plavba v dolech na Ostravsku** – tyristorové měniče vyřadily havarijní systém důlního kombajnu
- **havárie ve zdravotnických zařízeních**
 - vadný startér zářivky způsobil mylné vyhodnocení srdečního tepu
 - tyristorový stmívač světla způsobil zarušení kardiostimulátoru
 - rušení záznamu EKG – krátkovlnné vysílání ministerstva dopravy
- **zarušení TV signálu**

Rozdělení EMC



posouzení vlivu EM polí na živé organismy, zejména na člověka

výzkum vzájemného působení a zajištění koexistence technických prostředků, přístrojů a zařízení

EMC biologických systémů

- **tepelné účinky** – ohřev biologických tkání vlivem účinku EM pole
- **netepelné účinky** – déle trvající expozice polí s relativně nízkou výkonovou úrovní. Možný vliv na centrální nervový systém, imunitní systém, krevní oběh, případně genetické a karcinogenní účinky.
- **tvorba hygienických norem a předpisů**
- **nařízení vlády č. 291/2015 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením**
 - stanoví nejvyšší přípustné hodnoty záření od 0 do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz
 - rozlišuje zaměstnance a fyzické osoby
 - stanovuje podmínky pro EM záření a lasery
 - definuje označení míst, ve kterých nelze vyloučit vysokou expozici

Limitní hodnoty dle NV č. 291/2015 Sb.

- Elektrické pole

f [Hz]	E _{limit} [V/m]
0-25	20000
25-3000	$5 \cdot 10^5 / f$
3000-3,6·10 ⁶	170
3,6·10 ⁶ -10 ⁷	$6,1 \cdot 10^8 / f$
10 ⁷ -4·10 ⁸	61
4·10 ⁸ -2·10 ⁹	$0,003 \cdot f^{0.5}$
2·10 ⁹ -3·10 ¹¹	137

- Magnetické pole

f [Hz]	B _{limit} [T]
1-25	$0,025 / f$
25-300	10^{-3}
300 - 3000	$0,3 / f$
3000 - 2·10 ⁴	10^{-4}
2·10 ⁴ - 10 ⁷	$2 / f$
10 ⁷ - 4·10 ⁸	$2 \cdot 10^{-7}$
4·10 ⁸ - 2·10 ⁹	$10^{-11} f^{0.5}$
2·10 ⁹ - 3·10 ¹¹	$4,5 \cdot 10^{-7}$

- Hustota výkonového toku

f [Hz]	S _{limit} [W/m ²]
10 ⁷ - 4·10 ⁸	10
4·10 ⁸ - 2·10 ⁹	$f / 4 \cdot 10^7$
2·10 ⁹ - 3·10 ¹¹	50

Měrný pohlcený výkon - SAR

- **Specific Absorption Rate** – měrný pohlcený výkon
- mez SAR pro nejvytíženější pásmo 100 kHz – 10 GHz na celou osobu:
 - 0,4 W / kg – pro zaměstnance s vf. zářením
 - 0,08 W / kg pro obyvatelstvo
 - maximální doba expozice 6 minut
- mez SAR pro nejvytíženější pásmo 100 kHz – 10 GHz na malé části těla:
 - 10 W / kg (20 W pro ruce a chodidla) – pro zaměstnance
 - 2 W / kg (4 W pro ruce, chodidla a kotníky) pro obyvatelstvo
 - nejcitlivějším orgán – oči (špatné chlazení)
 - dnes antény na zadní straně, dříve výsuvné antény – až 50 % výkonu v hlavě

SAR vybraných mobilních telefonů

limity: 2 W / kg pro Evropu, 1,6 W / kg pro USA

Model	SAR (W/kg)	
	hlava	tělo
iPhone 13 Pro Max	1,18	1,19
Samsung Galaxy S22	1,05	1,58
Nokia XR20	1,13	1,43
Xiaomi Mi 11	0,555	0,982
Sony Xperia 1 iii	1,12	0,95

SAR vybraných mobilních telefonů

Samsung

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Samsung Galaxy S9	0,362	1,18
Samsung Galaxy S9+	0,294	1,350
Samsung Galaxy S8	0,315	1,27
Samsung Galaxy S8+	0,26	1,0
Samsung Galaxy Note 8	0,173	1,29
Samsung Galaxy Note 9	0,381	1,509
Samsung Galaxy A8 (2018)	0,241	1,250
Samsung Galaxy A3 (2017)	0,349	1,38
Samsung Galaxy A5 (2017)	0,349	1,38
Samsung Galaxy A6 (2018)	0,487	1,386
Samsung Galaxy A6+ (2018)	0,360	1,390
Samsung Galaxy A7 (2018)	0,335	1,425
Samsung Galaxy A9 (2018)	0,351	1,587
Samsung Galaxy J4+ (2018)	0,315	1,463
Samsung Galaxy J6+ (2018)	0,308	1,334

Apple

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
iPhone XS Max	0,99	0,99
iPhone XS	0,99	0,99
iPhone XR	0,99	0,99
iPhone X	0,93	0,99
iPhone 8 Plus	0,94	0,99
iPhone 8	1,35	1,36
iPhone 7 Plus	1,34	0,95
iPhone 7	1,37	1,39
iPhone SE	0,97	0,99

SAR vybraných mobilních telefonů

Huawei

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Huawei Mate 20 Pro	0,40	0,96
Huawei P smart 2019	0,83	1,00
Huawei P20	0,76	1,26
Huawei P20 Pro	0,73	1,22
Huawei P20 Lite	0,75	1,21
Huawei Nova 3	0,76	1,19
Huawei Y6 Prime (2018)	0,60	0,80
Huawei Y7 Prime (2018)	0,81	1,16
Huawei Y5 (2018)	0,36	1,06
Huawei P smart	1,27	0,99
Huawei Nova 3i	0,79	1,27

Honor

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Honor 7A	0,27	0,88
Honor 7C	0,89	1,09
Honor 7S	0,36	1,01
Honor 7X	1,07	1,28
Honor 8X	0,81	1,02
Honor 9 Lite	0,44	0,96
Honor 8	1,5	1,96
Honor 9	1,26	1,26
Honor 10	0,79	1,15
Honor 10 Lite	0,60	1,07
Honor View 10	0,77	0,99
Honor View 20	0,89	1,25
Honor Play	0,80	1,29

SAR vybraných mobilních telefonů

Xiaomi

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Xiaomi Mi A2 Lite	0,547	1,473
Xiaomi Mi A2	0,963	0,639
Xiaomi Mi 8	0,701	1,662
Xiaomi Pocophone F1	0,537	1,582
Xiaomi Redmi 6	0,550	1,417
Xiaomi Redmi Note 6 Pro	0,755	1,476
Xiaomi Redmi 6A	0,656	1,523
Xiaomi Redmi S2	0,429	1,577
Xiaomi Redmi Note 5	1,29	1,24
Xiaomi Redmi 5 Plus	1,013	1,470
Xiaomi Redmi 5	0,529	1,527
Xiaomi Mi MIX 3	1,448	1,568
Xiaomi Mi 8 Lite	0,749	1,585
Xiaomi Mi MIX 2S	0,542	1,593
Xiaomi MI A1	1,75	0,760

Nokia

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Nokia 1	0,549	1,588
Nokia 2.1	0,793	1,427
Nokia 3.1	0,64	1,63
Nokia 3310 3G	0,758	1,322
Nokia 5.1	0,29	1,80
Nokia 6.1	0,944	1,82
Nokia 7 Plus	0,361	1,776
Nokia 7.1	0,26	1,74
Nokia 8	0,711	1,330
Nokia 8 Sirocco	0,59	1,54
Nokia 8.1	0,514	1,490
Nokia 8110 4G	0,952	1,482

SAR vybraných mobilních telefonů

Sony

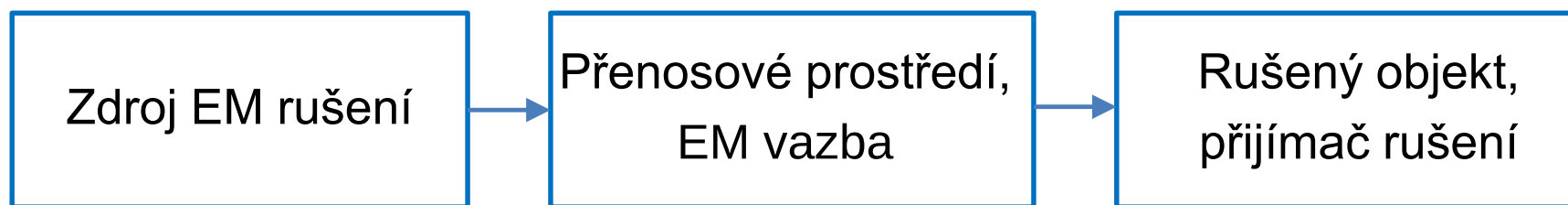
Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Sony Xperia XZ3	0,868	1,07
Sony Xperia XA2 Plus	1,41	1,34
Sony Xperia XZ2 Premium	0,55	0,68
Sony Xperia XZ2 Compact	0,77	1,05
Sony Xperia XZ2	0,56	0,94
Sony Xperia L2	0,47	1,22
Sony Xperia XA2	1,07	1,43
Sony Xperia XA2 Ultra	0,41	1,12

Motorola

Model	Hlava (W/Kg)	Tělo (W/Kg)
Motorola G6 Play	0.657	1.423
Motorola G6	0.636	1.365
Motorola Z2 Play	0.671	1.680
Motorola X4	0,815	1,540
Motorola One	0.463	0.800
Motorola E5 Play	0.572	1.588
Motorola E5	0.660	1.313
Motorola E5 Plus	0.898	1.473
Motorola Z3 Play	0.564	1.436

EMC technických systémů

Základní řetězec

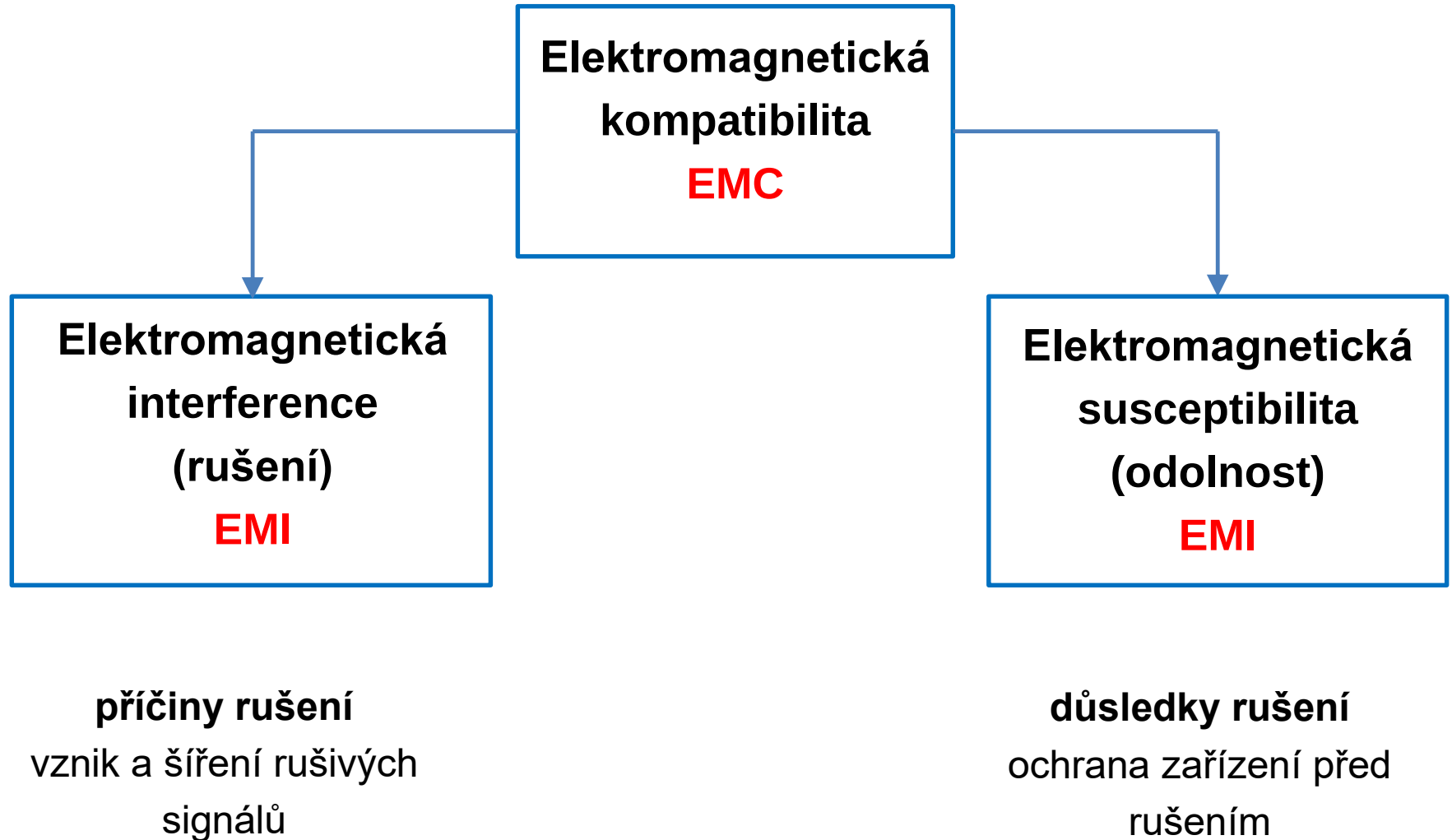


EM procesy v atmosféře
elektrostatické výboje
motory, spínače, relé
energetické rozvody
polovodičové měniče
zářivky, pece, svářečky
domácí spotřebiče
rozhl. a TV vysílače
počítače

vzdušný prostor
zemnění
energetické kabely
napájecí vedení
stínění
signálové vodiče
datové vodiče
společná napájecí síť

číslicová technika
počítače
měřicí přístroje
automatizační prostředky
telekomunikační systémy
systémy přenosu dat
rozhlasové přijímače
televizní přijímače

Základní členění EMC



Elektromagnetická interference

- měření rušení na vedení – napájecí, datové
- měření rušení vyzařovaného do prostoru
- měření rušení na plošných spojích (měření na vodičích, měření blízkého pole)

Elektromagnetická odolnost

- odolnost proti elektrostatickým výbojům (ESD)
- odolnost proti silným elektromagnetickým polím
- odolnost proti rychlým elektrickým přechodovým jevům (burst)
- odolnost proti rázovým vysokoenergetickým impulzům (surge)
- odolnost proti silným magnetickým polím (spojité 50 Hz, pulzní)

Speciální obory EMC

Vojenská a obranná oblast

- ochrana elektronických vojenských zařízení
- odolnost i při náročných bojových podmínkách
- omezení rušení civilních zařízení
- elektromagnetické zbraně – tzv. elektronický boj = zarušení protivníkových komunikačních a vojenských systémů
- vojenské normy EMC – MIL-STD – mnohem přísnější než civilní normy
- ochrana dat před elektromagnetickým únikem
- program **BAE Systems Tempes** – anglicko-japonská iniciativa v leteckém průmyslu

Automobilová a dopravní oblast

- obrovský nárůst elektroniky v automobilech, vlacích, lodích
- cena elektroniky v automobilech činí cca 30 % ceny
- zajištění bezpečnosti dopravy
- velmi důležité v oblasti autonomního řízení
- dělení:
 - EMC vozidla jako celku, pohonné, ovládací a řídicí systémy
 - EMC komponent a subsystémů = ESA (**E**lectronic **S**ub-**A**sembly)

Západní pojmy EMC

- Mezinárodní elektrotechnický slovník ČSN IEC 50

