



# ÚČINNOST A RYCHLOST NABÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ

## ELECTRIC VEHICLE CHARGING EFFICIENCY AND SPEED

Zdeněk Mašek<sup>1,\*</sup>, Michal Závodník<sup>2</sup>

**Abstrakt** Článek se věnuje experimentálnímu zjištění ztrát vznikajících při AC a DC nabíjení elektromobilu Hyundai Kona electric 64 kWh. U obou typů nabíjení je vyhodnocena celková účinnost nabíjení, round-trip účinnost trakční baterie, vlastní spotřeba vozidla při nabíjení, u AC nabíjení pak ještě účinnost palubní nabíječky vozidla. U DC nabíjení je patrný zásadní vliv teploty trakční baterie na rychlost a účinnost nabíjení. Účinnost nabíjení je vypočtena jako poměr energie spotřebované z trakční baterie v jízdě vůči energii dodané do vozidla následným nabíjením do stejné úrovně nabití trakční baterie jako před jízdou. U elektromobilu Hyundai Kona byla zjištěna průměrná účinnost AC nabíjení 85 %, účinnost DC nabíjení 92,1 % bez zahrnutí účinnosti DC nabíječky. Round-trip účinnost trakční baterie je u AC nabíjení 97,6 %, u DC nabíjení 92,7 %. Podíl spotřeby 12 V palubní sítě vozidla na celkovém příkonu vozidla během nabíjení se pohyboval od 0,3 do 0,9 %. Data pro vyhodnocení byla získána ze záznamů sedmnácti AC nabíjení v létě i v zimě uskutečněných po jízdách na různých typech silnic a tří DC nabíjení uskutečněných po jízdách na dálnici v zimě.

**Klíčová slova** elektromobilita, nabíjení, ztráty, spotřeba, energie, účinnost, baterie

**Summary** The aim of this paper is to experimentally evaluate energy losses during AC and DC charging of battery electric vehicle (BEV) Hyundai Kona electric 64 kWh. DC charging speed of four different types of BEVs was also measured and compared. Overall charging efficiency, round-trip battery efficiency, on-board electronics consumption during charging and on-board battery charger efficiency were calculated. A strong influence of battery temperature on charging speed and efficiency is observed in DC charging. Charging efficiency is calculated as ratio of energy consumed from battery during the trip to energy supplied by AC wallbox or DC charger during subsequent charging to the same battery state of charge level as at the beginning of the trip. Observed overall charging efficiencies of Hyundai Kona were 85 % (AC) and 92,1 % (DC). Calculated battery round-trip efficiency was 97,6 % (AC charging) and 92,7 % (DC charging). Vehicle's 12 V board net consumes about 0,3 to 1,4 % of total input power during charging. Data was collected from seventeen AC charging events after the test trips on various types of roads in summer and winter and three DC charging events after the test trips on highway in winter.

**Keywords** electromobility, charging, power, energy, losses, consumption, efficiency, battery, Hyundai, Kona

<sup>1</sup> Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika

<sup>2</sup> Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika

\* korespondenční autor, tel.: +420 466 036 403, e-mail: [zdenek.masek@upce.cz](mailto:zdenek.masek@upce.cz)

## 1 ÚVOD

S rostoucím počtem elektromobilů v provozu je nutné řešit vlivy dobíjení vozidel na energetickou distribuční soustavu. Uvažuje se o využití zaparkovaných elektromobilů jako zásobníků elektrické energie, které by umožnily zpětný tok energie z vozidla. Cílem pak je přímý vliv na stabilizaci energetické soustavy, která v důsledku zvyšujících se podílů obnovitelných zdrojů energie se stává méně stabilní než v minulosti (solární, větrné elektrárny a další typy zdrojů energie, jejichž výkon v průběhu dne kolísá a není zaručen). Využití elektromobilů nejen pro dopravu, ale i za tímto účelem, by mohlo vést ke snížení nákladů na jejich provoz a současně minimalizovat náklady na straně rozvodné sítě, tj. optimalizovat celkové náklady takového systému. Takový systém vyžaduje vhodné řízení toku energie, za účelem dosažení maximální účinnosti. Zároveň je nutné zohledňovat potřeby řidičů a případné další faktory technologie elektromobilu (např. stav nabití baterie, opotřebení baterie nebo účinnost palubních měničů). Jak vyplývá z některých studií, (např. Apostolaki-Oisifidou, 2017), velkou roli pro minimalizaci ztrát při transportu energie hraje účinnost elektrických komponent vozidla, které se účastní transportu el. energie z/do rozvodné el. sítě. Minimalizace těchto energetických ztrát znamená úsporu energie a financí.

Převrácená hodnota (bezrozměrně vyjádřená) účinnosti nabíjení nám říká, kolikanásobně více se do vozidla musí dodat energie oproti energii spotřebované provozem vozidla. Ideální účinnost 100 % není dosažitelná, vzhledem ke ztrátám v nabíjecí cestě a spotřebě pomocných spotřebičů spuštěných ve vozidle během nabíjení. U AC nabíjení je zásadní účinnost palubní nabíječky elektromobilu. U DC nabíjení odpadá nutnost přeměny střídavého proudu na stejnosměrný v palubní nabíječce elektromobilu, avšak díky vyššímu nabíjecímu výkonu a tím vyššímu proudu vznikají v HV baterii vyšší ztráty. Navíc je nutné uvažovat také ztráty vznikající (u DC nabíjení) v externí nabíječce mimo vozidlo, ve které opět dochází k přeměně střídavého proudu odebíraného z veřejné distribuční sítě na proud stejnosměrný. Ztráty v DC nabíječkách jsou zahrnuty v ceně za jednu kWh odebrané energie a při nominálním nabíjecím výkonu dosahují řádu jednotek procent (min. 5 %) dle (ABB, 2019), (ABB, 2021), v případě nižších nabíjecích výkonů jsou procentuální ztráty v DC nabíječce výrazně vyšší (Trentadue, 2018), až desítky procent. Tyto ztráty se pochopitelně budou násobit v případě, že by energie byla z vozidla zpětně vybita pro účely stabilizace centrální distribuční soustavy elektrické energie.

Hlavní náplní tohoto článku je snaha určit s jakými ztrátami energie je nutné uvažovat pro energetickou bilanci nabíjení a vybití elektromobilu v podmínkách ČR. V příspěvku je uvedena analýza energetických ztrát při vybití a nabíjení elektromobilu Hyundai Kona, s kapacitou trakční (HV) baterie 64 kWh a nájazdem cca 23 000 km. Data pro analýzu pocházejí z testovacích jízd prováděných na různých typech tras (město, okresní silnice, hory, dálnice). Jízdy byly realizovány v běžném provozu, nabíjení pak bylo prováděno všemi dostupnými způsoby, tj. AC (metoda wallbox i ICCB, viz dále v článku) i metodou DC (rychlónabíjení).

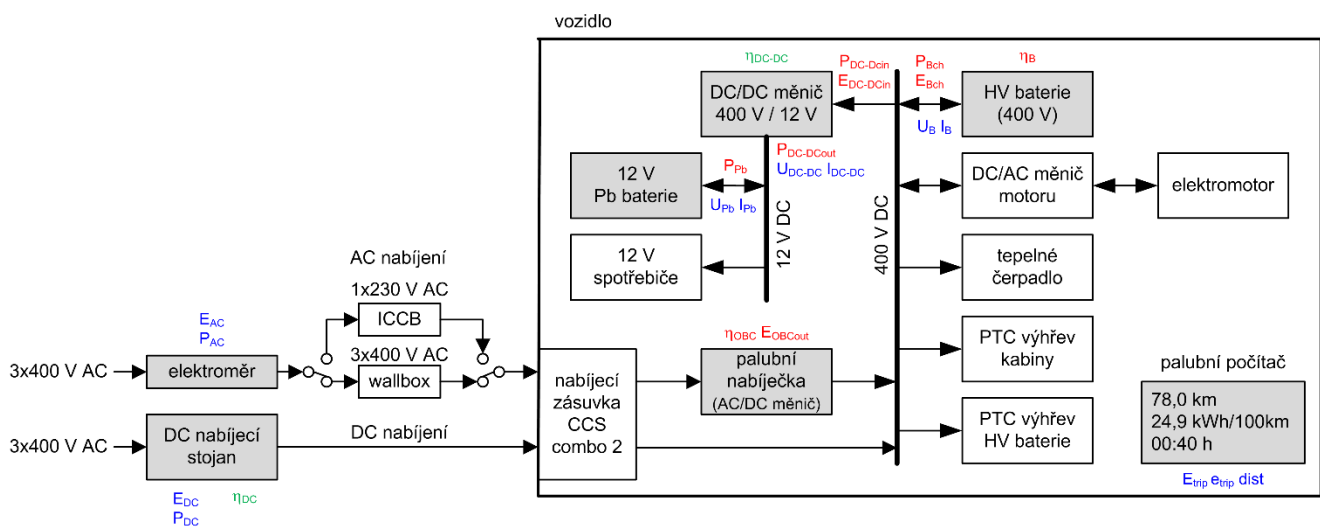
Hlavním výstupem z analýzy dat je stanovení celkové účinnosti nabíjení, počítané jako podíl energie odebrané z trakční (HV) baterie v jízdě a energie dodané při následném nabíjení. Dále určení účinnosti palubní nabíječky při AC nabíjení z wallboxu a round-trip účinnosti HV baterie, která v sobě zahrnuje vybití i nabíjecí ztráty. Uvedené ztráty lze určovat různými způsoby, což dokládá řada vědeckých článků a analýz prováděných odbornou veřejností. Určením ztrát v HV baterii a palubní nabíječce na straně vozidla a vybraných prvků elektrické rozvodné sítě, do které je vozidlo připojeno se věnuje práce (Apostolaki-Oisifidou, 2017). Studie (Reick, 2021) se zabývá spotřebou energie vozidla Kia e-Niro (vozidlo se stejným typem elektropohonu jako sesterská Hyundai Kona) na válcové zkušební v jízdním cyklu WLTC, ztrátami v pohonu a v palubní nabíječce a přepočtením těchto ztrát na množství CO<sub>2</sub> po ujetí 100 000 km. Stanovením účinnosti elektropohonu a palubní nabíječky elektromobilu VW e-Up na válcovém dynamometru při několika konstantních rychlostech od 35 do 100 km/h se zabývá práce (Konzept, 2022). Zajímavá jsou také měření provedená německým autoklubem ADAC (ADAC, 2020, 2021), které se zaměřují na stanovení ztrát energie při nabíjení různých typů elektromobilů z wallboxu plným a sníženým nabíjecím výkonem a z jednofázového nabíjecího kabelu (ICCB) z výbavy vozidla.

Tab. 1 Seznam zkratek

Zkratka	Význam
AC	Střídavý proud.
DC	Stejnoseměrný proud.
HV baterie	Vysokonapěťová trakční baterie elektromobilu.
ICCB	In-cable Control Box. Zařízení pro nabíjení elektromobilu střídavým proudem z běžné zásuvky 230 V AC. Zajišťuje komunikaci s vozidlem a sleduje bezpečnost el. propojení.
Round-trip účinnost baterie	Účinnost HV baterie počítaná z poměru energie z ní odebrané při jejím vybíjení ku energii do baterie dodané při následném nabíjení. Vypovídá o vybíjecích a nabíjecích ztrátách energie v baterii.
SOC (State Of Charge)	Úroveň nabití baterie (0 až 100 %).
Wallbox	Zařízení pro nabíjení elektromobilu střídavým proudem z rozvodné sítě 3x400 V AC. Zajišťuje komunikaci s vozidlem a sleduje bezpečnost el. propojení.

## 2 ZPŮSOB SBĚRU A VYHODNOCENÍ DAT

Pro stanovení účinnosti nabíjení, round-trip účinnosti HV baterie, účinnosti palubní nabíječky při AC nabíjení a spotřeby 12 V sítě vozidla je třeba získat informace o výkonech v různých částech nabíjecího řetězce. Na obr. 1 je zobrazen blokový diagram s komponentami a výkonovými toky. Modrým textem jsou označeny měřené veličiny, červeně dopočítávané a zeleně odhadnuté. Existuje několik způsobů, jak informace o potřebných výkonových tocích získat.



Obr. 1 Blokový diagram nabíjení elektromobilu Hyundai Kona 64 kWh; zdroj: autoři

Zřejmě nejpřesnější metodou, která eliminuje dohady o přesnosti měření, je nezávislé měření veličin (proudů, napětí) externími měřidly osazenými na vozidlo, u kterých je známa přesnost měření. V závislosti na typu elektromobilu toto však nemusí být, bez zásahu do jeho elektroinstalace, proveditelné. To byl i náš případ zapůjčeného elektromobilu Hyundai Kona, u něž by toto externí měření bylo možné jen po zásahu do elektroinstalace vozidla a vystavení se tím rizika ztráty záruky na vozidlo ze strany výrobce. Proto jsme zvolili méně invazivní metodu měření veličin vozidla – vyčítáním dat z řídicích jednotek přes diagnostickou OBD zásuvku pomocí vhodného adaptéru a softwaru. Tato metoda má nevýhodu v neznámé přesnosti měření veličin, protože výrobce vozidla tyto informace nezveřejňuje.

Na vozidle byly prostřednictvím OBD zásuvky dostupné tyto veličiny:

- Řídicí jednotka HV baterie

- Napětí a proud baterie ( $U_B, I_B$ ).
- DC-DC měnič pro palubní 12 V síť
  - Napětí a proud na výstupu měniče ( $U_{DC-DC}, I_{DC-DC}$ ).
  - Napětí a proud 12 V olovené baterie ( $U_{Pb}, I_{Pb}$ ).
- Měrná spotřeba energie [kWh/100km] a ujetá vzdálenost [km] zobrazované na palubní desce.

Hodnota energie dodaná do nabíjecí zásuvky vozidla byla získána těmito způsoby:

- AC nabíjení – výkon a energie měřena digitálním elektroměrem s přesností 1 % ( $P_{AC}, E_{AC}$ ). V údajích z elektroměru je zahrnuta i vlastní spotřeba wallboxu nebo ICCB.
- DC nabíjení – energie uvedená na displeji nabíječky, nebo na faktuře z nabíjení (pravděpodobná přesnost měření 1 %), ( $E_{DC}$ ).

Na obr. 1 jsou šedou barvou vybarveny bloky z nichž byla použita výše uvedená data.

## 2.1 Výpočet účinnosti nabíjení

Pojem účinnost nabíjení, použitý v tomto dokumentu, je třeba chápat jako porovnání energie spotřebované v jízdě s energií dodanou do vozidla při následném nabíjení do stejné úrovně nabití (SOC) jako na začátku jízdy. Bodem, ve kterém je účinnost stanovena, je nabíjecí zásuvka vozidla (zajímá nás účinnost od nabíjecí zásuvky směrem do vozidla). Tento bod je zvolen účelně proto, aby do výsledné účinnosti byly zahrnuty všechny faktory, které mají vliv na výslednou cenu za odebranou energii z distribuce. Do této účinnosti se promítají ztráty energie v přenosové cestě (ztráty v AC palubní nabíječe v případě AC nabíjení, ztráty na vodičích), ztráty v HV baterii při jejím nabíjení i vybíjení v jízdě před nabíjením a také vlastní spotřeba vozidla během nabíjení (napájení řídicích jednotek ve vozidle, případný výhřev/chlazení HV baterie, dobíjení 12 V olovené baterie, vnitřní a vnější osvětlení, spuštění klimatizace/topení apod.).

Účinnost nabíjení  $\eta_c$  [-]:

$$\eta_c = \frac{E_{trip}}{E_{AC} \text{ nebo } E_{DC}} \quad (1)$$

kde  $E_{trip}$  je energie [kWh] spotřebovaná z HV baterie v jízdě, která předcházela nabíjení, a  $E_{AC}$  nebo  $E_{DC}$  je energie [kWh] dodaná do vozidla přes nabíjecí zásuvku při následném AC nebo DC dobíjení.

Energie spotřebovaná z HV baterie v jízdě před nabíjením  $E_{trip}$  [kWh]:

$$E_{trip} = e_{trip} \cdot dist \quad (2)$$

kde  $e_{trip}$  je měrná spotřeba energie v jízdě [kWh/100km] a  $dist$  je ujetá vzdálenost [km]. Obě veličiny byly přečteny z přístrojové desky na konci každé jízdy, která předcházela nabíjení. V sedmi jízdách na dálnici (pomalé změny v proudu a napětí HV baterie) jsme ověřili, že údaj o měrné spotřebě [kWh/100km] zobrazovaný na přístrojové desce odpovídá energii vypočtené jako integrál součinu napětí  $U_B$  a proudu  $I_B$  HV baterie.  $U_b$  a  $I_b$  byly vyčítány přes OBD zásuvku. Byly zjištěny odchylky do 0,6 %. Ve výpočtu energie  $E_{trip}$  jsme raději použili měrnou spotřebu  $e_{trip}$  z přístrojové desky místo jejího výpočtu z  $U_b$  a  $I_b$ , protože frekvence čtení dat z OBD zásuvky byla nízká (cca 2 Hz) a v dynamičtějších jízdách (ve městě, okresní silnici) by mohlo docházet k chybné hodnotě vlivem podvzorkování a tím zkreslení všech dalších výpočtů. Zjištěná odchylka stanovení energie  $E_{trip}$  mezi těmito dvěma způsoby byla v jízdách ve městě a na okresních silnicích (dynamičtější jízda) až 4,9 % oproti 0,6 % na dálnici (spíše ustálená jízda).

## 2.2 Výpočet round-trip účinnosti HV baterie

Round-trip účinnost HV baterie se vypočítá jako poměr energie z HV baterie spotřebované v jízdě  $E_{trip}$  ku energii do baterie dodané při jejím následném nabíjení  $E_{Bch}$ :

$$\eta_B = \frac{E_{trip}}{E_{Bch}} = \frac{E_{trip}}{\int u_B i_B dt} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \quad (3)$$

Všechny energie jsou v [kWh]. Účinnost baterie v sobě zahrnuje ztráty v baterii při jejím vybíjení a nabíjení. Ztráty v baterii jsou způsobeny především jejím vnitřním odporem a velikost těchto ztrát závisí na stavu baterie (SOC a teplotě) a velikosti proudu  $I_B$  (Bloom, 2001), (Apostolaki-Oisifidou, 2017). U lithiových baterií se jejich nabíjecí+vybíjecí ztráty pohybují v jednotkách procent (Apostolaki-Oisifidou, 2017).

## 2.3 Výpočet účinnosti palubní nabíječky

Účinnost palubní nabíječky  $\eta_{OBC}$  je vypočtena jako poměr energie  $E_{OBCout}$  dodané do vozidla ze stejnosměrného výstupu palubní nabíječky ku činné energii  $E_{AC}$ , kterou palubní nabíječka odebírá ze střídavé sítě skrz wallbox nebo jednofázový nabíjecí kabel (ICCB). Činná energie (energie počítaná z činného výkonu)  $E_{AC}$  byla měřena elektroměrem. Vypočtená účinnost  $\eta_{OBC}$  tak zahrnuje i vlastní spotřebu wallboxu nebo ICCB. Hodnota okamžitého výkonu na stejnosměrném výstupu nabíječky nebyla dostupná na OBD zásuvce. Proto byl tento výkon dopočítán jako součet výkonu dodávaného do HV baterie a příkonu DC-DC měniče 12 V palubní sítě. Uvažovalo se, že žádné jiné spotřeby než tyto dvě ve vozidle během nabíjení nepůsobí (vozidlo nebylo nastartováno, klimatizace/topení bylo vypnuto během nabíjení). Avšak ani příkon DC-DC měniče nebylo možné změřit, proto byl dopočítán z výkonu na výstupu DC-DC měniče a jeho odhadnuté účinnosti  $\eta_{DC-DC} = 0,94$  na základě hodnot uváděných v literatuře (Musavi, 2011), (Drobnik, 2013).

$$\eta_{OBC} = \frac{E_{OBCout}}{E_{port}} = \frac{E_{Bch} + E_{DC-DCin}}{E_{port}} = \frac{\int u_B i_B dt + \frac{\int u_{DC-DC} i_{DC-DC} dt}{\eta_{DC-DC}}}{E_{port} \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (4)$$

Všechny energie jsou v [kWh].

## 2.4 Výpočet spotřeby 12 V palubní sítě vozidla během nabíjení

Jedná se o stanovení příkonu DC-DC měniče pro palubní 12 V napájecí síť. Příkon  $P_{DC-DCin}$  DC-DC měniče nebylo možné změřit, proto byl vypočten z výkonu  $P_{DC-DCout}$  na jeho výstupu a účinnosti DC-DC měniče odhadnuté na 94 %. Výkon na výstupu DC-DC měniče byl vypočten ze součinu napětí a proudu na výstupu, což byla data dostupná na OBD zásuvce.

$$P_{DC-DCin} = \frac{P_{DC-DCout}}{\eta_{DC-DC}} = \frac{U_{DC-DC} I_{DC-DC}}{0,94} \quad (5)$$

Výkon, kterým se dobíjí (+) nebo vybíjí (-) 12 V olověná baterie:

$$P_{pb} = U_{pb} I_{pb} \quad (6)$$

Všechny výkony jsou ve [W].

### 3 AC NABÍJENÍ Z WALLBOXU

Hyundai Kona je vybavena třífázovou palubní nabíječkou 3x400 V AC / 16 A o štítkovém výstupním výkonu 10,5 kW. Elektromobil byl nabíjen z našeho školního wallboxu EVECUBE S 22 kW. Pomocí digitálního elektroměru s třídou přesnosti 1 % byla při AC nabíjení měřena energie odebraná ze sítě 3x400 V AC na vstupu do wallboxu, aby mohla být porovnána s energií spotřebovanou v jízdě, která nabíjení předcházela, přičemž baterie byla nabíjena do stejné úrovně nabití (SOC) jakou měla na začátku jízdy, aby porovnání bylo možné.

Byly testovány tyto případy:

- Nabíjení z wallboxu (třífázové nabíjení)
  - plným výkonem (cca 11 kVA) – na wallboxu nastaven limit fázových proudů na 16 A.
  - sníženým výkonem (cca 6,9 kVA) – na wallboxu nastaven limit fázových proudů na 10 A.
- Nabíjení z jednofázového nabíjecího kabelu (ICCB) 230 V AC / 10 A z výbavy vozidla výkonem cca 2,3 kVA.
- Vliv stupně nabití (SOC) HV baterie na účinnost nabíjení – pouze v jednom případě (nabíjení z wallboxu sníženým výkonem – střídavým proudem 10 A).

Vyjma jednoho případu probíhala všechna nabíjení do 100 % SOC. Počáteční stav nabití HV baterie byl proměnný, neboť závisel na délce a náročnosti testovací jízdy, která nabíjení předcházela. Byla vyhodnocena data z celkem 18 nabíjení. Data z nabíjení sníženým výkonem z wallboxu (fázový proud 10 A) a z jednofázového nabíjecího kabelu ICCB pocházejí ze zimního měření, ve kterém se teplota HV baterie pohybovala mezi 3 až 12 °C. Data z nabíjení plným výkonem z wallboxu (fázový proud 16 A) pocházejí z letního měření, ve kterém se teplota HV baterie při nabíjení pohybovala mezi 22 až 34 °C.

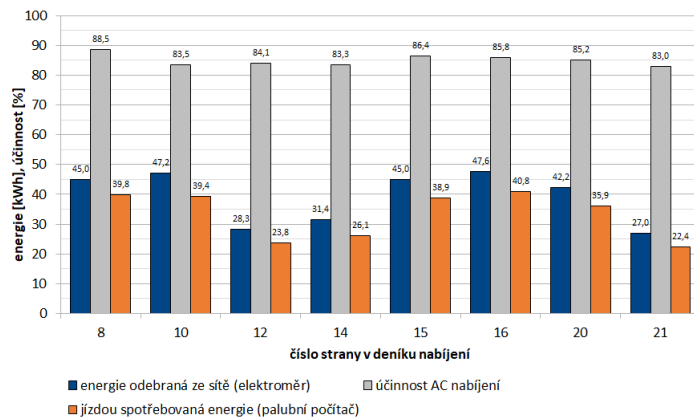
#### 3.1 Účinnost AC nabíjení

Z poměru spotřebované energie (vypočtené z údaje palubního počítače vozidla) a energie spotřebované ze sítě 3x400 V AC (měřené elektroměrem) byla stanovena účinnost AC nabíjení. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2.

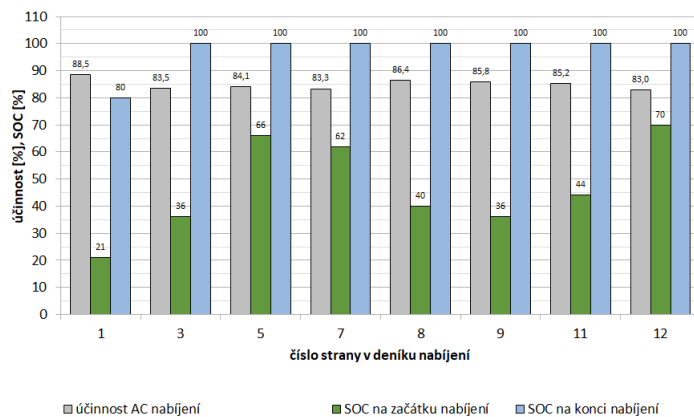
Tab. 2 Účinnost AC nabíjení elektromobilu Hyundai Kona 64 kWh do 100 % SOC

Typ nabíjení	Prům. účinnost AC nabíjení	Min./max. účinnost AC nabíjení
3f wallbox (3x400 VAC / 10 A)	84,7 % (6 nabíjení)	83,3 % / 86,4 %
3f wallbox (3x400 VAC / 16 A)	85,0 % (9 nabíjení)	82,3 % / 89,5 %
1f ICCB (1x 230 VAC / 10 A)	83,0 % (1 nabíjení)	-

Nejvyšší účinnosti nabíjení 88,5 % bylo dosaženo při nabíjení do SOC 80 % z wallboxu střídavým proudem 10 A. Na rozdíl od studií (ADAC, 2022) a (Apostolaki-Oisifidou, 2017) se nepotvrdilo, že by nabíjení pomocí jednofázového nabíjecího kabelu (ICCB) 230 VAC / 10 A výrazně zhoršovalo účinnost nabíjení. Ve článku (Reick et al., 2021) autoři totiž naměřili účinnost AC nabíjení s ICCB kabelem jen 79,58 %. Nabíjení sníženým výkonem z wallboxu (střídavým proudem 10 A) nemá na účinnost vliv, což je v souladu s výsledky uvedenými v článku (Reick et al., 2021), ve kterém autoři testovali elektromobil Kia e-Niro, které je vybaven stejnou elektro-výzbrojí jako sesterská Hyundai Kona. Dosažené hodnoty účinností AC nabíjení z wallboxu jsou v souladu i s výsledky, které na sesterské Kia e-Niro naměřil německý autoklub ADAC (ADAC, 2020). Vliv teploty baterie na účinnost AC nabíjení není na průměrné účinnosti nabíjení vůbec patrný (alespoň ne v rozsahu našich teplot od +5 do +30 °C).



Obr. 2 Účinnost AC nabíjení z wallboxu střídavým proudem 10 A (Hyundai Kona 64 kWh); zdroj: autoři



Obr. 3 Stav nabití baterie při nabíjení z wallboxu střídavým proudem 10 A (Hyundai Kona 64 kWh); zdroj: autoři

### 3.2 Účinnost palubní nabíječky a vlastní spotřeba vozidla během nabíjení

Účinnost palubní nabíječky ve vozidle byla vypočtena z dat jednoho letního nabíjení z wallboxu plným výkonem (fázový proud wallboxu 16 A) jako podíl energie dodané palubní nabíječkou do vozidla ( $E_{OBCout}$ ) ku spotřebě činné energie změřené elektroměrem na střídavé straně ( $E_{port}$ ). Výsledky jsou uvedeny v tab. 3. Round-trip účinnost HV baterie 97,6 % je srovnatelná s výsledky zjištěnými v laboratoři na vozidle BWM MiniE autory článku (Apostolaki-Oisifidou, 2017).

Tab. 3 Účinnosti v AC nabíjení elektromobilu Hyundai Kona 64 kWh do 100 % SOC z wallboxu proudem 16 A

Účinnost AC nabíjení	Účinnost palubní nabíječky	Round-trip účinnost HV baterie	Ztráty vlivem vlastní spotřeby vozidla
87,0 %	90,1 %	97,6 %	0,9 %

Vlastní spotřeba vozidla (spotřeba 12 V palubní sítě) během nabíjení HV baterie byla změřena ve třech nabíjeních z wallboxu. Přes OBD zásuvku se během nabíjení vyčítal proud a napětí na výstupu DC-DC měniče, který z vysokého napětí HV baterie vytváří napětí 12 V pro palubní síť, a proud 12 V olovené baterie. Průměrný výkon DC-DC měniče pro 12 V palubní síť se pohyboval od 78 W do 92 W, z toho byl 3 W až 23 W průměrný nabíjecí výkon 12 V olovené baterie, která má kapacitu 40 Ah. Její stav nabití se v těchto třech nabíjeních změnil následovně: ze 74 na 85 %, z 82 na 89 % a z 80 na 85 %. Uvažujeme průměrný výkon DC-DC měniče 12 V palubní sítě 92 W, činný příkon třífázové palubní nabíječky na AC straně 6,2 kW, její účinnost 90 % a účinnost DC-DC měniče 94 %. Pak lze konstatovat, že spotřeba palubní 12 V sítě vozidla se při nabíjení HV baterie podílí na celkovém AC příkonu vozidla ve výši cca 1,4 %. Při nabíjení plným výkonem (činný příkon třífázové palubní nabíječky 11 kW) pak bude tento podíl ještě nižší, jen 0,9 %.

## 4 DC NABÍJENÍ NA VEŘEJNÉ NABÍJEČCE

V rámci testování byl elektromobil Hyundai Kona electric 64 kWh 7x nabíjen na veřejném DC nabíjecím stojanu ČEZ o max. výstupním výkonu 50 kW (typ ABB Terra 54). Data byla během nabíjení vyčítána z OBD zásuvky vozidla. Na konci nabíjení se z nabíjecího stojanu, nebo z faktury opsala odebraná energie a čas nabíjení.

Nalogoaná data byla následně vyhodnocena:

- Rychlost nabíjení a velikost nabíjecího výkonu v závislosti na teplotě HV baterie a SOC.
- Účinnost nabíjení, resp. o kolik kWh energie se musí do baterie dobít navíc vůči energii spotřebované jízdou.
- Porovnání rychlosti DC nabíjení elektromobilů různých typů.

V příznivých podmínkách (nízký stav nabití, teplota všech článků HV baterie nad 25 °C) dokáže vůz Hyundai Kona electric 64 kWh nabíjet výkonem až 75 kW. Tento výkon jsme během našich DC nabíjení v zimě nikdy nedosáhli z několika důvodů:

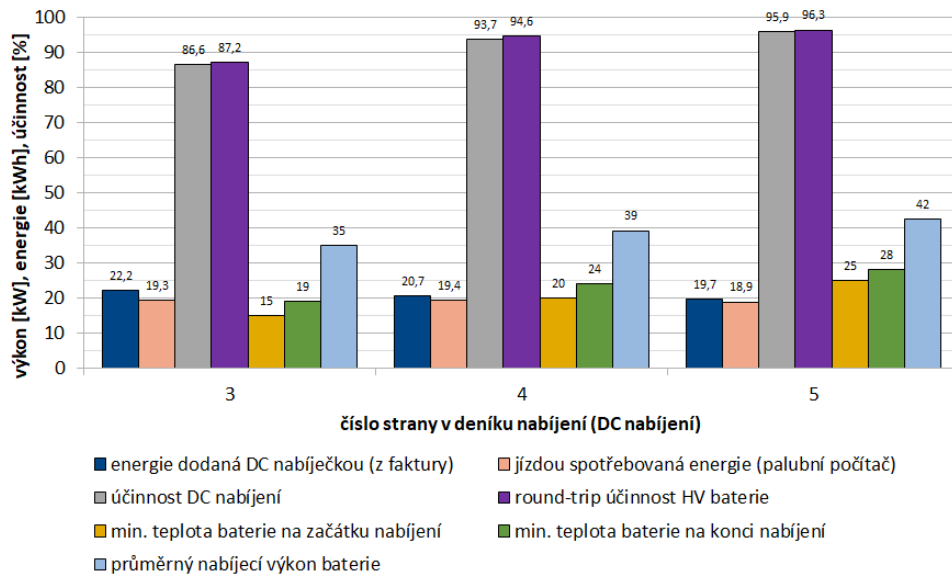
- Nabíjeli jsme na veřejných nabíjecích stojanech s max. výkonem 50 kW.
  - I přes to nelze počítat s tím, že se vozidlo bude nabíjet vždy výkonem 50 kW (viz dále).
- Nabíjecí výkon HV baterie není konstantní.
  - Od cca 75 % SOC se zdatelně snižuje, nad 90 % SOC je již na úrovni AC nabíjení (11 kW) a s dále rostoucím SOC se dále snižuje a čas nabíjení se neúměrně prodlužuje.
  - Z tohoto důvodu má opravdu smysl na DC nabíječkách nabíjet jen do 80 %, aby se nabíjení neúměrně neprotahovalo.
- Nízká teplota HV baterie - min. teplota HV baterie při spuštění nabíjení byla v rozsahu od 9 do 25 °C.
- Průměrný výkon nabíjení za celou dobu nabíjení se pohyboval od 16 do 42 kW v závislosti na teplotě baterie, jejím počátečním a koncovém stavu nabití.

V rozsahu minimálních teplot článků baterie od 9 °C do 25 °C, ve kterém jsme se při nabíjeních pohybovali, nedocházelo k aktivnímu vyhřívání HV baterie. Nevyhřívání baterie během DC nabíjení má negativní dopad na dobu nabíjení, která se tím prodlužuje.

### 4.1 Účinnost DC nabíjení

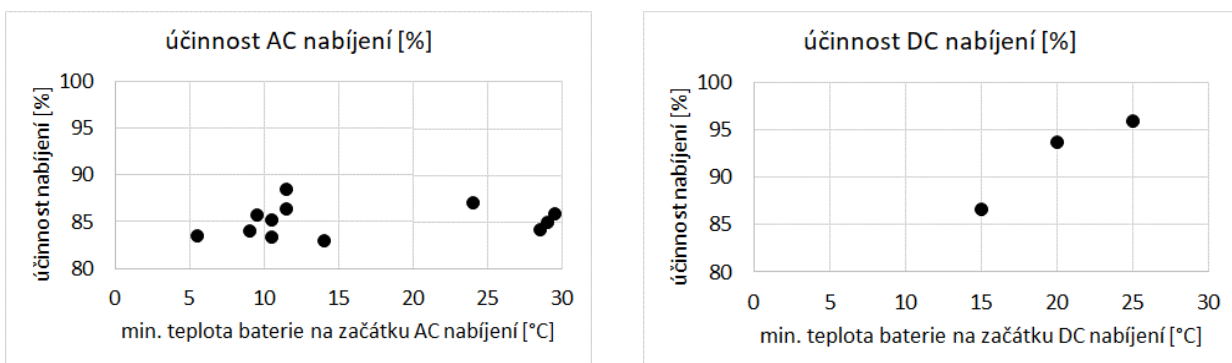
Pro vozidlo Hyundai Kona electric 64 kWh jsou dostupná data ze třech po sobě jdoucích DC nabíjení na stejné veřejné nabíjecí stanici o výkonu 50 kW. DC nabíjení následovalo vždy po ujetí stejné trasy po dálnici s max. rychlostí 130 km/h, kdy začátek a konec trasy byl na té samé nabíjecí stanici. Během všech DC nabíjení byla minimalizována vlastní spotřeba vozidla vypnutím „zapalování“ a v kabině se netopilo. Teplota okolí se během nabíjení pohybovala od +1 do +3 °C. Teplota HV baterie se během nabíjení pohybovala v rozmezí od +15 do +28 °C. Nabíjení vždy skončilo po dosažení 80 % SOC, začátek nabíjení byl na 52 až 54 % SOC.





Obr. 4 Účinnost DC nabíjení (Hyundai Kona 64 kWh); zdroj: autoři

Z dat lze vysledovat souvislost účinnosti DC nabíjení (určena především round-trip účinností HV baterie) s teplotou baterie. Vidíme, že s klesající teplotou baterie klesá i účinnost DC nabíjení. Závislost účinnosti nabíjení na teplotě není patrná u AC nabíjení vzhledem k výrazně (2x až 8x) nižšímu nabíjecímu výkonu.



Obr. 5 Závislost účinnosti nabíjení na teplotě HV baterie; zdroj: autoři

V tab. 4 je uvedeno porovnání průměrných účinností DC a AC nabíjení. Průměry jsou počítané ze třech provedených DC nabíjení a z devíti AC nabíjení z wallboxu plným výkonem palubní nabíječky (cca 10,5 kW).

Tab. 4 Průměrná účinnost AC a DC nabíjení vozidla Hyundai Kona 64 kWh

Typ nabíjení	Průměrná účinnost nabíjení	Prům. round-trip účinnost HV baterie	Ztráty vlivem vlastní spotřeby vozidla	Teplotní rozsah HV baterie
AC nabíjení	85,0 %	cca 97,6 % (1 měření)	cca 0,9 %	5 až 30 °C
DC nabíjení	92,1 %	92,7 %	cca 0,3 %	15 až 30 °C

Uvedené účinnosti nabíjení znamenají navýšení měrné spotřeby v [kWh/100 km] a ceny za ujetý kilometr v průměru o cca 7,9 % (DC) až 15 % (AC). U DC nabíjení oproti AC nabíjení odpadají ztráty v palubní nabíječce vozidla, je však vyšší proud do HV baterie a tím vyšší nabíjecí ztráty v baterii a tedy nižší round-trip účinnost baterie. Při teplotách HV baterie od cca 20 °C vychází DC nabíjení stejně účinné nebo účinnější než AC nabíjení, díky cca 10 % ztrátám energie v palubní AC nabíječce. Avšak pokud do výpočtu zahrneme i účinnost DC nabíjecího stojanu  $\eta_{DC} = 94 \%$  (ABB, 2019), abychom porovnávali účinnosti nabíjení ve stejném bodě (tj. na střídavém přívodu do nabíječky), bude průměrná účinnost DC nabíjení cca 86,6 % na

vstupu střídavého napětí 3x400 V AC do DC nabíječky. To je hodnota srovnatelná s účinností AC nabíjení, avšak jen za předpokladu, že teplota HV baterie v DC nabíjení bude cca 20 °C. Při nižší teplotě HV baterie bude mít DC nabíjení horší účinnost než AC nabíjení. Sníženou účinnost DC nabíjení při nízkých teplotách baterie dokládají i praktické výsledky testování různých typů DC nabíjecích stojanů ve studii (Trentadue, 2018). Zejména při teplotách pod 0 °C je účinnost DC nabíječky velmi nízká (i méně než poloviční než při teplotě 25 °C). To je způsobeno několikanásobně menším nabíjecím výkonem, který záměrně omezuje battery management vozidla, aby nedošlo k poškození studené HV baterie. Vypočtená účinnost HV baterie při 25 °C nám vyšla 96,3 %. Je to podobná hodnota jako ve studii (Micari, 2022), ve které autoři naměřili účinnost lithiové baterie 96,01 % během simulace jejího zrychleného stárnutí za pomoci cyklického vybíjení/nabíjení baterie při 25 °C. Baterie byla ve zmíněné studii vybíjena profilem proudu, který simuloval jízdu vozidla v jízdním cyklu WLTC. Bateriové články nabíjeli proudem o velikosti 1 C (simulace rychlonabíjení), což je o něco vyšší proud, než by odpovídal průběhu výkonu při DC nabíjení našeho testovaného vozidla Hyundai Kona na DC nabíječce. Odpovídající nabíjecí proud jednotlivými články HV baterie se v našem testu DC nabíjení při teplotě 25 °C HV baterie pohyboval mezi cca 0,82 až 0,39 C. Porovnání těchto dvou výsledků tedy není zcela přesné, protože ve WLTC cyklu je jízda po dálnici zastoupena pouze cca 1/3 jeho délky v km (průměrná rychlost v něm je 46,5 km/h, což je méně než při našich jízdách po dálnici), na druhou stranu jsme v našich testech HV baterii nabíjeli nižším proudem. Round-trip ztráty v baterii by tak mohly být v našem měření a ve zmíněném článku podobné. Ukazuje se, že tomu tak opravdu je.

## 4.2 Vlastní spotřeba vozidla během nabíjení

Vlastní spotřeba vozidla (spotřeba 12 V palubní sítě) během DC nabíjení HV baterie byla změřena ve všech třech případech. Přes OBD zásuvku se během nabíjení vyčítal proud 12 V olověné baterie a proud a napětí na výstupu DC-DC měniče, který vytváří napětí 12 V pro palubní síť. Průměrný výkon DC-DC měniče 12 V palubní sítě se pohyboval od 95 W do 124 W, z toho byl 2 W až 14 W průměrný nabíjecí výkon 12 V olověné baterie (ta se téměř nedobíjela). Uvažujme průměrný nabíjecí výkon HV baterie 38,8 kW, průměrný výkon DC-DC měniče 107 W a jeho účinnost 94 %. Pak lze konstatovat, že spotřeba palubní 12 V sítě vozidla se u DC nabíjení HV baterie podílí na nabíjecím DC příkonu v průměrné výši cca 0,3 %.

## 4.3 Vliv teploty HV baterie na rychlost nabíjení

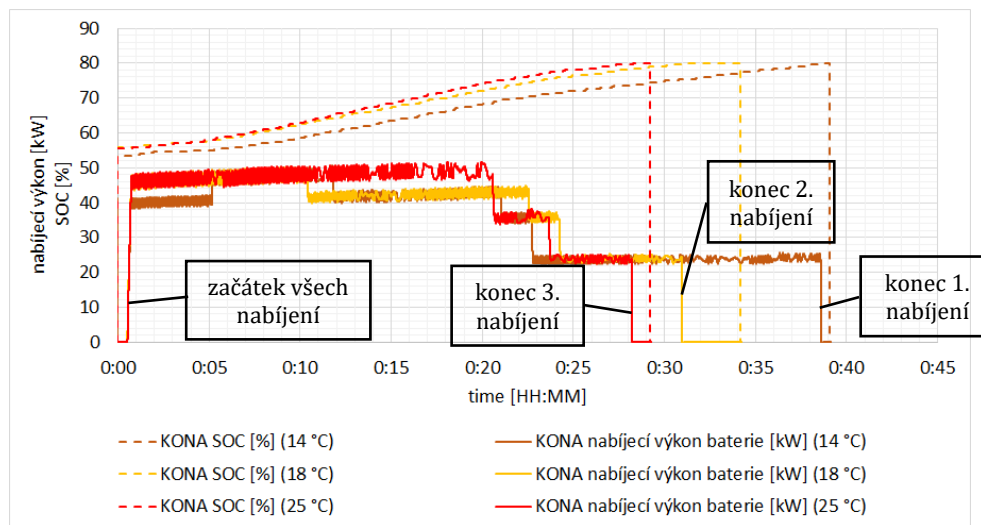
Nabíjecí výkon HV baterie závisí na její teplotě (přesněji na článku baterie s nejmenší teplotou). Při teplotách výrazně pod 25 °C se již viditelně prodlužuje doba DC nabíjení.

Vliv teploty zde bude demonstrován na třech DC nabíjeních elektromobilu Hyundai Kona 64 kWh. Všechna nabíjení byla provedena vždy po jízdě na dálnici D11 na trase o délce 77,1 km max. rychlostí 130 km/h. Výchozí a cílový bod trasy byla DC nabíječka ČEZ 50 kW na čerpací stanici Benzina u Osic na D11 ve směru z Prahy na Hradec Králové. Ve všech jízdách bylo dosaženo podobného množství spotřebované energie (podobné počáteční SOC), takže doba následného DC dobíjení by měla být ovlivněna zejména rozdílnou minimální teplotou článku HV baterie na začátku nabíjení (14, 18 a 25 °C).

Tab. 5 Vliv teploty HV baterie na rychlost DC nabíjení (Hyundai Kona 64 kWh)

	min. teplota baterie na začátku nabíjení [°C]	počáteční SOC [%]	koncové SOC [%]	průměrný nabíjecí výkon [kW]	doba nabíjení [hh:mm:ss]	rychlost nabíjení [km/h]
<b>1. nabíjení</b>	14	53	80	35	0:38:37	120
<b>2. nabíjení</b>	18	56	80	39	0:30:26	152
<b>3. nabíjení</b>	25	55	80	42	0:27:42	167

V případě nejteplejší HV baterie (25 °C) se nabíjecí výkon drží delší dobu na maximální hodnotě, než začne klesat (červená křivka v obr. 6). Průměrný nabíjecí výkon je vyšší a doba nabíjení je kratší o cca 3 minuty (o 10 %). Za hodinu DC nabíjení bychom do baterie dodali energii pro ujetí dalších 167 kilometrů po dálnici.



Obr. 6 Vliv teploty HV baterie na průběh výkonu DC nabíjení (Hyundai Kona 64 kWh); zdroj: autoři

## 5 ZÁVĚR

U vozidla Hyundai Kona electric 64 kWh nebyl pozorován rozdíl v celkové (round-trip) účinnosti AC nabíjení při nabíjení z wallboxu maximálním střídavým fázovým proudem 16 A a sníženým na 10 A. Při nižších nabíjecích proudech lze očekávat zhoršení účinnosti nabíjení zaviněné sníženou účinností palubní nabíječky. Při použití jednofázového nabíjecího kabelu ICCB (230 VAC / 10 A / 2,3 kVA) nebylo pozorováno výrazné snížení účinnosti nabíjení, v průměru jen o cca 1,7 až 2,0 % vůči třífázovému nabíjení z wallboxu fázovými proudy 10 A (6,9 kVA) a 16 A (11 kVA). To je v rozporu s výsledky uváděnými v literatuře (Reick, 2021), (ADAC, 2022). Pro přesnější porovnání by však bylo potřeba provést ne jedno nabíjení, ale nejlépe stejný počet AC nabíjení s ICCB kabelem po stejných jízdách jako u nabíjení z wallboxu. Z časových důvodů toto nebylo v našem případě možné. V žádném z AC nabíjení nebyl v rozsahu teplot +5 °C až +30 °C HV baterie pozorován vliv teploty HV baterie na účinnost nabíjení. Průměrná celková účinnost AC nabíjení z wallboxu plným maximálním proudem 16 A (11 kVA) byla 85 % (výsledek z devíti nabíjení plným výkonem), round-trip účinnost HV baterie pak 97,6 % (výsledek pouze z jednoho nabíjení). Vlastní spotřeba energie vozidla během AC i DC nabíjení je téměř zanedbatelná, pohybuje se okolo 100 W. S rostoucím nabíjecím výkonem tato složka ztrát, vyjádřená v procentech, klesá a při nabíjecím příkonu 11 kW na nabíjecí zásuvce činí cca 0,9 %. U DC nabíjení pak je na úrovni cca 0,4 %, pokud během nabíjení není aktivní výhřev HV baterie (v našich testech nebyl výhřev aktivní při teplotách HV baterie nad +15°C).

DC nabíjení vozidla Hyundai Kona electric 64 kWh probíhala ze stavu nabití 52 až 54 % do 80 % na nabíjecím stojanu o jmenovitém výkonu 50 kW. Celková účinnost DC nabíjení je, vzhledem k nepotřebě palubní nabíječky, dána především round-trip účinností HV baterie. Účinnost HV baterie je silně závislá na její teplotě a vybíjecím/nabíjecím proudu. Zjistili jsme, že při teplotách HV baterie pod 20 °C účinnost i rychlost nabíjení viditelně klesají. V provedených třech po sobě jdoucích testech (jízda po dálniční trase 78 km s následným DC dobíjením) jsme dosáhli celkovou účinnost DC nabíjení 92,7 %. Při započítání účinnosti DC nabíjecí stanice 94 % do celkové účinnosti nabíjení bychom se dostali na hodnotu cca 86,6 % na vstupu střídavého napětí 3x400 V AC do DC nabíječky. To už je hodnota srovnatelná s AC nabíjením. Po sobě jdoucí testovací jízdy s následným nabíjením měly ten efekt, že účinnost nabíjení s každým dalším nabíjením rostla, protože se HV baterie každou další jízdou a zejména nabíjením zahřívala. V rozsahu teplot HV baterie +15 až +30 °C jí batterymanagement během nabíjení cíleně nevyhříval. Vliv stavu nabití

HV baterie na účinnost DC nabíjení ani nabíjení na DC nabíječe s vyšším výkonem nebylo možné ověřit vzhledem k omezenému času na testování.

S ohledem na budoucí předpokládané velké rozšíření elektromobilů a jejich zapojení do AC rozvodné el. sítě za účelem využití jejich baterie i pro řízenou dodávku výkonu z vozidla do rozvodné sítě v okamžiku, kdy vozidlo bude zaparkováno, je třeba zvolit takový algoritmus řízení rozvodné sítě, který zajistí odběr/dodávku výkonu z/do baterie s nejvyšší účinností. To znamená používat během připojení vybíjecí/nabíjecí výkon, který je minimálně cca 50 % jmenovitého výkonu palubní nabíječky vozidla. V konstrukci el. systému vozidla je třeba volit, pokud možno, vícefázové palubní nabíječky, které dosahují vyšší účinnosti než jednofázové.

## Poděkování

Děkujeme firmě Hyundai Motor Czech s.r.o. za zapůjčení elektromobilu Hyundai Kona 64 kWh na testování. Děkujeme kolegovi Ondřejovi Sadílkovi z naší katedry za ochotu při realizaci testovacích jízd s Hyundai Kona.

## Literatura

Bloom, I., Cole, B., Sohn, J., Jones, S., Polzin, E., Battaglia, V. **2001**. An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 101 (2001), s. 237-247. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00783-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00783-2)

Musavi, F., Edington, M., Eberle, W., Dunford W.G. **2011**. Energy efficiency in plug-in hybrid electric vehicle chargers: Evaluation and comparison of front end AC-DC topologies. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 17. – 22. září. Phoenix, AZ, USA.

Drobnik, J., Jain, P. **2013**. Electric and Hybrid Vehicle Power Electronics Efficiency, Testing and Reliability. 17. - 20. listopadu. *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. Spain: Barcelona.

Genovese, A., Ortenzi, F., Villante, C. **2015**. On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. *World Electric Vehicle Journal*, 7(4), s. 570-576. <https://doi.org/10.3390/wevj7040570>

Kieldsen, A., Thingvad, A., Martinenas, S., Sorensen, T.M. **2016**. Efficiency Test Method for Electric Vehicle Chargers. *Proceedings of EVS29 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. 19. – 22. června. Montreal, Québec: Kanada, s. 485–488. [https://orbit.dtu.dk/files/137328554/efficiency\\_paper.pdf](https://orbit.dtu.dk/files/137328554/efficiency_paper.pdf)

Apostolaki-Oisifidou, E., Codani, P., Kempton, W. **2017**. Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy*, 127 (2017), s. 730-742. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015>

Trentadue, G., Lucas, A., Otura, M., Pliakostathis, K., Zanni, M., Scholz, H. **2018** Evaluation of Fast Charging Efficiency under Extreme Temperatures. *Energies*, 11(8), s. 1937. <https://doi.org/10.3390/en11081937>

Reick, B., Konzept, A., Kaufmann, A., Stetter, R., Engelmann, D. **2021**. Influence of Charging Losses on Energy Consumption and CO2 Emissions of Battery-Electric Vehicles. *Vehicles*, 3, s. 736–748. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040043>

Konzept, A., Reick, B., Kaufmann, A., Hermanutz, R., Stetter, R. **2022**. Battery electric vehicle efficiency test for various velocities. *Vehicles*, 4, s. 60-73. <https://doi.org/10.3390/vehicles4010004>

Micari, S., Foti, S., Testa, A., De Caro, S., Sergi, F., Andaloro, L., Aloisio, D., Leonardi, S.G., Napoli, G. **2022**. Effect of WLTP CLASS 3B Driving Cycle on Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles. *Energies*, 15, s. 6703. <https://doi.org/10.3390/en15186703>

ABB. **2019.** *Terra 54 multi-standard DC charging station.* Datasheet. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK1074920233&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

ABB. **2021.** *Terra HP high power charging.* Dostupné z: [https://www07.abb.com/images/librariesprovider107/default-album/untitled-1-copy.png?sfvrsn=48dd2309\\_1&CropWidth=800&CropHeight=633&Quality=High&CropX=0&CropY=0&Width=800&Height=633&Method=CropToFixedAreaCropToFixedAreaArguments&Key=b70da1cea6430805b4d37144bdeda4ff](https://www07.abb.com/images/librariesprovider107/default-album/untitled-1-copy.png?sfvrsn=48dd2309_1&CropWidth=800&CropHeight=633&Quality=High&CropX=0&CropY=0&Width=800&Height=633&Method=CropToFixedAreaCropToFixedAreaArguments&Key=b70da1cea6430805b4d37144bdeda4ff)

ADAC. **2020.** *Verbrauch laut Bordcomputer: Exakt bis voll daneben.* [Online]. Dostupné z: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/autotest/bordcomputer-verbrauchswerte/> [cit.: 2.10.2022].

ADAC. **2022.** *Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden.* [Online]. Dostupné z: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/> [cit.: 1.10.2022].

ADAC. **2022.** *Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich.* [Online]. Dostupné z: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/> [cit.: 1.10.2022].