

BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADE

Deniss Stepins, Jānis Zaķis



Deniss Stepins, Jānis Zaķis

BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADE

Mācību grāmata

RTU Izdevniecība
Rīga 2024

Deniss Stepins, Jānis Zaķis. Bezvadu elektroenerģijas pārvade. Mācību grāmata. Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. 70 lpp.

Šī ir pirmā mācību grāmata, kas veltīta bezvadu elektroenerģijas pārvades jautājumiem. Grāmatā apskatīta bezvadu elektroenerģijas pārvades attīstības vēsture, lietošana, klasifikācija, parametri un standarti. Atsevišķa nodaļa veltīta dažādu bezvadu pārvades metožu apskatam, lielāko uzmanību pievēršot rezonanses induktīvās pārvades metodei. Grāmatā ir arī sniegta detalizēta informācija par bateriju bezvadu uzlādes ierīcēm, kuru darbības pamatā ir rezonanses induktīvās pārvades metode.

Mācību grāmata būs noderīga studentiem, kuri apgūst elektroniku un enerģētiku, skolēniem, kuri apgūst padziļināto fizikas kursu, kā arī visiem, kas interesējas par energoapgādi, elektroenerģijas pārvadi un izmantošanu.

Recenzents prof. Pēteris Apse-Apsītis

Atbildīgā par izdevumu Anita Vēciņa
Redaktore Dzintra Birnbauma
Maketētāja Baiba Puriņa
Vāka dizainere Paula Lore

Vāka attēls *Shutterstock.com*

<https://doi.org/10.7250/9789934370359>
ISBN 978-9934-37-035-9 (pdf)

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2024
© Deniss Stepins, 2024
© Jānis Zaķis, 2024

SATURS

LIETOTIE GALVENIE APZĪMĒJUMI	4
LIETOTIE SAĪSINĀJUMI	4
IEVADS.....	5
1. VISPĀRĪGAS ZIŅAS PAR BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADI (BEP)	6
1.1. Bezvadu elektroenerģijas pārvades sistēmas pamatprincips.....	6
1.2. Bezvadu pārvades sistēmu parametri.....	8
1.3. Bezvadu elektroenerģijas pārvades vēsture.....	9
1.4. BEP metožu un sistēmu klasifikācija	13
1.5. BEP lietojumi	14
1.6. BEP standarti	20
1.6.1. Svarīgākie BEP standarti.....	20
1.6.2. Citi ar BEP saistīti standarti	22
2. BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADES METODES	25
2.1. Induktīvā pārvades metode	25
2.2. Rezonanses induktīvā pārvades metode.....	32
2.2.1. Rezonanses induktīvā pārvade ar divām spolēm.....	32
2.2.2. Rezonanses induktīvā pārvade ar trim un četrām spolēm.....	44
2.2.3. BEP rezonanses induktīvās sistēmas ar divām spolēm	47
2.3. BEP kvazistatiskā tilpuma rezonanses metode.....	51
2.4. BEP kapacitatīvā metode.....	52
2.5. Tālā lauka elektromagnētiskās enerģijas bezvadu pārvades metodes.....	54
2.5.1. Elektroenerģijas pārvade ar mikroviļņiem	54
2.5.2. Elektroenerģijas pārvade ar optisko starojumu.....	55
2.6. Bezvadu enerģijas pārvades akustiskās metodes.....	56
3. AKUMULATORU BATERIJU STATISKĀS BEZVADU UZLĀDES IERĪCES AR REZONANSES INDUKTĪVO SISTĒMU	57
3.1. Akumulatoru bateriju uzlādes metodes.....	57
3.2. Akumulatoru bateriju bezvadu uzlādes ierīču darbības princips un blokshēmas	58
3.3. Akumulatoru bateriju bezvadu uzlādes ierīču lietderības koeficienta uzlabošana konstanta sprieguma režīmā	64
ATSAUČU SARAKSTS	66

LIETOTIE GALVENIE APZĪMĒJUMI

η	BEP sistēmas lietderības koeficients
f_{sw}	Invertora komutācijas frekvence
P_{iz}	BEP sistēmas izejas aktīvā jauda
M	Mijinduktivitāte starp spolēm
k	Saites koeficients
L_1	Raidošās (primārās) spoles induktivitāte
L_2	Uztverošās (sekundārās) spoles induktivitāte
C_1	Primārās daļas kompensācijas kondensatora kapacitāte
C_2	Sekundārās daļas kompensācijas kondensatora kapacitāte
f_{rez}	Primārā un sekundārā kontūra rezonanses frekvence
U_{iz}	BEP sistēmas izejas sprieguma līdzkomponente
R_{sl}	BEP sistēmas slodzes pretestība
R_{ekv}	BEP sistēmas ekvivalentā slodzes pretestība
R_{bat}	Uzlādējamas baterijas ieejas ekvivalentā pretestība
i_1	Primārā rezonanses kontūra strāva (momentānā vērtība)
i_2	Sekundārā rezonanses kontūra strāva (momentānā vērtība)
U_{invm}	Invertora izejas sprieguma maksimālā vērtība

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

BEP	Bezvadu elektroenerģijas pārvade
EM	Elektromagnētisks
EMS	Elektromagnētiskā saderība
KSp	Konstants spriegums
KSt	Konstanta strāva
SKANS	Starptautiskā komisija aizsardzībai pret nejonizējošo starojumu (ICNIRP)
EDS	Elektrodzinējspēks

IEVADS

Līdz ar cilvēku vēlmi atvieglot ikdienas sadzīvi, arvien plašāku mobilo elektronisko un elektrisko ierīču lietošanu, kā arī ar arvien pieaugošo elektrottransporta popularitāti pilsētās, elektroenerģijas pārvade bez vadiem un kontaktiem kļūst arvien aktuālāka. Bezvadu elektroenerģijas pārvade (BEP) ir ērts un drošs paņēmieni, kā elektroenerģiju pārvadīt no enerģijas avota līdz slodzei, neizveidojot fizikālu elektrisko kontaktu. BEP ļauj pilnībā automatizēt bateriju uzlādes procesu dažādām mobilajām ierīcēm, tādām kā portatīvās elektroniskās ierīces (telefoni, bezvadu austiņas, bārdas skujamie aparāti, elektriskās zobu sukuks), kustīgie sensori, elektrottransporti, mobilie roboti, autonomie zemūdens aparāti u. c. Pateicoties tam, ka nav nepieciešams veidot fizikālu elektrisko kontaktu starp slodzi un enerģijas avotu, nepastāv tāda problēma kā dzirksteļošana (kas var būt ļoti bīstama vietās, kur gaisā ir sprādzienbīstamas gāzes), kontaktu dilšana, īsslēgumi kontaktu vietā (kas var būt saistīti, piemēram, ar mitrumu) un kontaktvirsmu oksidēšanās. BEP būtiski atvieglo automātisko bateriju uzlādi zem ūdens jūrā vai okeānā, kur ūdens īpatnējā vadītspēja ir pietiekami liela. To var izmantot, ne tikai bezvadu bateriju uzlādei, bet arī lai nepārtraukti pievadītu elektroenerģiju kustīgam patērētājam. BEP var izmantot gan laukus (elektrisko vai magnētisko), gan arī viļņus (elektromagnētiskos vai pat akustiskos).

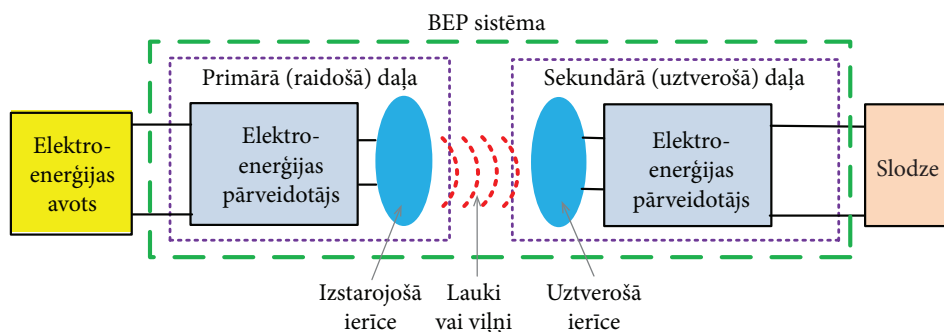
Mūsdienās BEP ir viens no aktuālākajiem elektrotehnikas un elektronikas nozares virzieniem un ļoti strauji attīstās, to apliecina lielais komercializācijas pieaugums, patenti, un zinātnisko rakstu par BEP skaits pēdējos desmit gados. Līdz ar šī pētniecības virziena attīstību parādās arvien jauni tā lietojumi. Līdz ar BEP sistēmu vadības metožu, shēmatehnisko, tehnoloģisko un konstruktīvo risinājumu, kā arī pusvadītāju un magnētisko komponentu bāzes nepārtrauktu uzlabošanu, interese pasaulē par BEP nepārtraukti pieaug.

Pēc šīs grāmatas autoru ziņām, šī ir pirmā pilnvērtīgā grāmata latviešu valodā par bezvadu elektroenerģijas pārvadi. Tās mērķis ir iepazīstināt ar zināmajām BEP metodēm un to attīstības vēsturi un veicināt izpratni par tām, izmantojot vienkāršotu pieeju. Galvenā uzmanība grāmatā ir veltīta vispopulārākajai BEP metodei – rezonanses induktīvai metodei, kuru mūsdienās visbiežāk izmanto akumulatoru bateriju bezvadu uzlādei. Mācību grāmata galvenokārt paredzēta augstskolu elektrotehnikas specialitāšu studentiem, kā arī ikvienam, kurš vēlas paplašināt zināšanas šajā jomā. Grāmatas satura veiksmīgai apgūšanai būtu nepieciešamas priekšzināšanas elektrotehnikas teorētisko pamatu, elektrības, magnētisma un energoelektronikas jomās.

1. VISPĀRĪGAS ZIŅAS PAR BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADI (BEP)

1.1. Bezvadu elektroenerģijas pārvades sistēmas pamatprincips

BEP sistēma sastāv no divām daļām: no primārās un sekundārās daļas (1.1. att.). Primāro daļu sauc arī par raidošo, bet sekundāro – par uztverošo daļu. Elektroenerģija no enerģijas avota (piem., elektriskais tīkls, akumulatoru baterija, ģenerators u. c.) plūst caur BEP sistēmas primārās daļas elektroenerģijas pārveidotāju uz izstarojošo ierīci. Atkarībā no BEP sistēmas tipa izstarojošā ierīce rada lauku (magnētisko vai elektrisko) vai viļņus (mikroviļņus, gaismu vai ultraskaņu), kas virzās uz uztverošo ierīci. Tā uztverto lauku vai viļņus pārveido elektroenerģijā, kas tālāk caur sekundārās daļas elektroenerģijas pārveidotāju izplatās uz BEP sistēmas slodzi (piem., akumulatoru bateriju). Tātad starp primāro un sekundāro daļu nepastāv mehānisks vai elektrisks savienojums, enerģija tiek pārvadīta ar lauku vai viļņiem. Jāatzīmē, ka izstarojošā un uztverošā ierīce var atrasties gan nelielā (piem., daži milimetri), gan arī ievērojami lielā attālumā (piem., metrus vai pat kilometrus) viena no otras.¹



1.1. att. BEP sistēmas vispārīgā blokshēma.

Vide, kurā izplatās enerģiju pārnesešie lauki vai viļņi, var minimāli vai būtiski ietekmēt elektroenerģijas pārvades efektivitāti. Tas ir atkarīgs no vides veida un viļņu vai lauka tipa. Piemēram, laikā mainīgus magnētiskus laukus var izmantot,

¹ Darbības attāluma diapazons ir atkarīgs gan no BEP sistēmas lietojuma, gan arī no izmantotās BEP metodes.

lai pārvadītu elektroenerģiju gaisā, ūdenī, gan arī caur cietiem dielektriskiem šķēršļiem. Gaiss, strāvu nevadoši šķidrums (piem., destilēts ūdens) un cieti nemagnētiski dielektriski objekti praktiski neietekmē elektroenerģijas pārvadi ar laikā mainīga magnētiskā lauka palīdzību, taču enerģijas pārvade ar laikā mainīgo magnētisko lauku (ar augstu frekvenci) strāvu vadošos šķidrumos (piem. jūras ūdens) var izraisīt lielus enerģijas zudumus. Savukārt gaismu var pārvadīt tikai curspīdīgā vidē (piem., gaisā bez būtiskas necaurspīdīgu gāzu koncentrācijas), jo necaurspīdīgi šķēršļi absorbē gaismu.

Gan izstarojošo, gan arī uztverošo ierīci var uzskatīt par enerģijas pārveidotāju, jo tās var pārveidot, piem., elektroenerģiju magnētiskā lauka enerģijā vai mikroviļņu enerģijā. Izstarojošā ierīce var būt, piemēram, induktivitātes spole bez vai ar ferīta paplāksni, metāla plates, antena, lāzers vai pat ultraskaņas viļņu izstarojošā ierīce. Izstarojošā un uztverošā ierīce ir viena tipa ierīces. Piemēram, ja izstarojošā ierīce ir induktivitātes spole, tad uztverošā ierīce arī ir induktivitātes spole; ja izstarojošā ierīce ir antena, tad uztverošā ierīce arī ir antena utt. Izstarojošā ierīce lauku un viļņus var izstarot visos virzienos vai vienā virzienā koncentrējot to šaurā kulī. Otrajā gadījumā enerģiju var pārvadīt lielā attālumā.

Elektroenerģijas pārveidotājs, kas ir primārajā daļā, pārveido elektroenerģijas avota enerģiju un sagatavo to normālai izstarojošās ierīces darbībai. Primārās daļas elektroenerģijas pārveidotāji var veikt dažādas funkcijas, piem., pārveidot zemfrekvences maiņspriegumu augstfrekvences maiņspriegumā (kuru tālāk izstarojošā ierīce, piem., induktivitātes spole, pārveido laikā mainīgā magnētiskajā laukā), mainīt ieejas sprieguma līmeni (paaugstināt vai pazemināt), veikt jaudas faktora korekciju (ja BEP sistēma ir pieslēgta maiņstrāvas elektrotīklam) u. c. Sekundārās daļas elektroenerģijas pārveidotājs, saņemot elektroenerģiju no uztverošās ierīces, pārveido to atbilstoši slodzes prasībām, piem., augstfrekvences maiņspriegumu pārveido līdzspriegumā, maina sprieguma līmeni, nodrošina konstantas strāvas vai konstanta sprieguma režīmu (kāds ir nepieciešams, piem., akumulatoru baterijas uzlādei) u. c.

Lai realizētu īpatnējus BEP sistēmas darbības režīmus (piem., konstantas izejas strāvas vai konstanta izejas sprieguma režīmu), primārajai daļai bieži vien ir nepieciešama informācija (no atbilstošiem sensoriem) par BEP sistēmas regulējamo izejas parametru (piem., izejas strāva vai spriegums), tātad ir nepieciešama atgriezeniskā saite starp BEP sistēmas primāro un sekundāro daļu. Šajā gadījumā ir nepieciešami vienvirziena bezvadu sakari starp sekundāro un primāro daļu.

1.2. Bezvadu pārvades sistēmu parametri

BEP sistēmas galveno parametru nosaukumi un to skaidrojums ir apkopoti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

BEP sistēmas svarīgākie parametri un to skaidrojums

Parametrs	Skaidrojums
BEP sistēmas lietderības koeficients	Apzīmē ar η . Tas raksturo BEP sistēmas izejas aktīvās jaudas (P_{iz}) attiecību pret ieejas aktīvo jaudu (P_{ie}). η parasti izsaka procentos.
Pārvades attāluma diapazons	Ar pārvades attāluma diapazonu parasti saprot pieļaujamo attālumu starp izstarojošo un uztverošo ierīci, kurā BEP sistēma var ilgstoši darboties, tās pamatparametriem saglabājoties tehniskajā specifikācijā noteiktajās robežās.
Ieejas sprieguma veids	Atkarībā no ieejas elektroenerģijas avota BEP sistēma var būt līdzsprieguma vai maiņsprieguma. Ja ieejā ir maiņspriegums, tad parasti norāda arī ieejas avota strāvas frekvenci un pieļaujamo novirzi.
Ieejas sprieguma diapazons	Ja ieejā ir līdzspriegums, tad norāda tā diapazonu. Savukārt, ja ieejā ir maiņspriegums, tad norāda tā ieejas maiņsprieguma efektīvo vērtību (vidējo kvadrātisko vērtību) diapazonu.
Izejas darbības režīms	Iespējami trīs režīmi: konstantas strāvas (KSt) režīms, konstanta sprieguma (KSp) režīms un KSt režīms, kam seko KSp režīms.
Nominālā izejas strāva	Izejas strāva, ar kādu BEP sistēma var ilgstoši darboties, tās pamatparametriem saglabājoties tehniskajā specifikācijā noteiktajās robežās.
Nominālais izejas spriegums	Izejas spriegums, ar kādu BEP sistēma var ilgstoši darboties, tās pamatparametriem saglabājoties tehniskajā specifikācijā noteiktajās robežās.
Nominālā izejas jauda	Izejas jauda, ar kādu BEP sistēma var ilgstoši darboties, tās pamatparametriem saglabājoties tehniskajā specifikācijā noteiktajās robežās.
Vadāmības un izstaroto elektromagnētisko traucējumu līmenis	Līmeņus norāda noteiktā frekvenču diapazonā, izmantojot elektromagnētiskās saderības standartā noteiktās mērīšanas metodikas.
Izstaroto lauku/viļņu pamatfrekvence	Pamatharmonikas frekvence.
Izejas strāvas un izejas sprieguma pielaide	KSt režīmā pielaide norāda strāvai, bet KSp režīmā – spriegumam.
Primāro un sekundāro daļu izmēri, tilpums un masa	
Jaudas blīvums	Nominālās izejas jaudas attiecība pret BEP sistēmas kopējo tilpumu. Parasti to izsaka kW/dm^3 .

1.3. Bezvadu elektroenerģijas pārvades vēsture

BEP vēsture aizsākās 19. gadsimta beigās ar Nikolas Teslas eksperimentiem. Pirms runājam par BEP vēsturi nedaudz pakavēsimies pie būtiskiem zinātniskiem atklājumiem fizikā (apkopoti 1.2. tabulā), kas sekmējuši elektroenerģijas bezvadu pārvades attīstību.

1.2. tabula

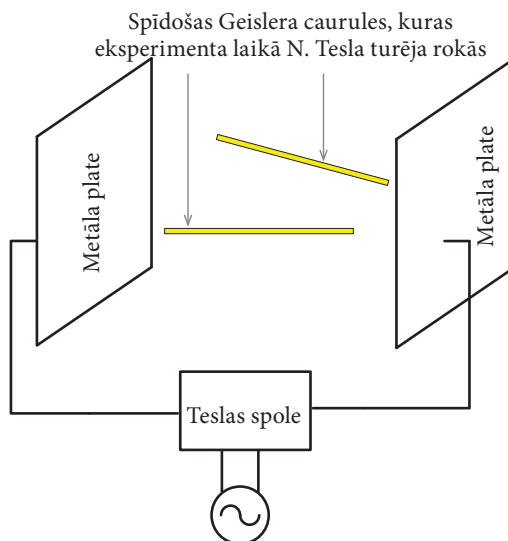
Svarīgākie atklājumi fizikā, kas sekmēja BEP attīstību

Atklājuma gads	Iesaistītais zinātnieks	Atklājums
1820.	Hanss Erstedts	Eksperimentāli pierādīja, ka kompasas bultiņa novirzās, ja elektriskā strāva plūst vadītājā, kas novietots tuvu kompasam. Tas bija pirmais eksperimentālais pierādījums tam, ka elektriskā strāva var radīt magnētisko lauku.
1831.	Maikls Faradejs	Elektromagnētiskās indukcijas parādība.
1864.	Džeims Maksvels	Hipotēze par elektromagnētisko viļņu esamību.
1887.	Heinrihs Hercs	Eksperimentāli atklāja elektromagnētiskos viļņus.
1891.	Nikola Tesla	Izgudroja "Teslas spoli" ² . Teslas izgudrojums būtībā bija augstfrekvences augstsprieguma rezonanses transformators, kuru tajos laikos izmantoja augstfrekvences elektrisko svārstību iegūšanai signālu un enerģijas bezvadu pārraidei.
1899.	Guljelmo Markoni	Demonstrēja elektrisko signālu bezvadu pārraidi lielā attālumā (no Anglijas uz Franciju).

BEP pionieris N. Tesla 19. gadsimta beigās pētīja iespēju bez vadiem pārvadīt elektroenerģiju ar induktīvo vai kapacitatīvo metodi. Tā, piem., 1891. gadā Kolumbijas koledžā (Ņujorka) viņš demonstrēja elektroenerģijas bezvadu pievadi Geislera caurulēm³, izmantojot elektrostatisko indukciju. [2] N. Teslas BEP eksperimenta shēma ir parādīta 1.2. attēlā. Lai iedegtu divas Geislera caurules (eksperimenta laikā viņš tās turēja rokās), neizveidojot elektrisko kontaktu ar elektroenerģijas avotu, zinātnieks Teslas spoli pieslēdza divām metāla platēm, starp kurām veidojās laikā mainīgs elektriskais lauks, kas jonizēja gāzi Geislera caurulē, un tā izstaroja redzamu gaismu.

2 "Teslas spoli" sauc arī par "Teslas transformatoru". Tā sastāv no augstsprieguma kondensatora, primārās spoles (ar nelielu vijumu skaitu), daudzvijumu sekundārās spoles (kas ir induktīvi saistīta ar primāro spoli) un dzirksteļspraugas. Teslas spole būtībā ir augstsprieguma un augstfrekvences rezonanses sistēma, kurā divi svārstību kontūri ir induktīvi saistīti. Tai jāpievada enerģija no maiņsprieguma avota. Plašāku informāciju par Teslas spoli var atrast, piem., [1].

3 Geislera caurule ir pirmā gāzes izlādes spuldze, kas tika izgudrota 1857. gadā.



1.2. att. N. Teslas BEP eksperimenta shēma (1891. g).

20. gadsimta sākumā N. Tesla turpināja pētījumus BEP jomā. Tā, piemēram, 1901. gadā viņš sāka ambiciozo BEP projektu, kura ietvaros gribēja izveidot lielas jaudas augstspriegumu raidošu staciju (viņš to nosauca par Vardenklifas torni⁴), lai lielos attālumos pārraidītu elektroenerģiju un ziņojumus – no ASV līdz pat Lielbritānijai. [3] Taču 1904. gadā izbeidzās šī ambiciozā projekta finansējums, un Vardenklifas tornis tā arī netika līdz galam pabeigts un ap 1917. gadu tika nojaukts.

No 1910. gada līdz Otrā Pasaules kara beigām būtiska uzmanība bija veltīta galvenokārt bezvadu sakariem. Tika izveidotas pirmās raidstacijas un attīstīti radiosakari lielos attālumos, bet vēlāk izveidotas arī televīzijas stacijas un pirmie radari.

20. gadsimta sešdesmitajos gados interese par BEP atjaunojās. 1964. gadā ASV izgudrotājs Viljams Brauns (*Villiam Braun*) eksperimentāli pētīja iespēju pārvadīt elektroenerģiju ar mikroviļņu palīdzību un izgudroja rektenu (angļu val. – *rectifying antenna*)⁵ (antena ar taisngriezi uztverto radioviļņu pārveidošanai līdzstrāvā), bet E. Tarsons (*E. Tarrson*) 1968. gadā saņēma patentu [4] par bezkontakta induktīvo pārvades sistēmu elektriskās sukas uzlādei.⁶ V. Braunam (1964. g.) izdevās ar mikroviļņu palīdzību pārvadīt elektroenerģiju līdz neliela izmēra bezapkalpes helikopteram (rotora nominālā jauda ap 270 W), kas lidinājās 60 pēdu (18,29 m) augstumā virs mikroviļņus izstarojošas antenas. [5]

4 Angļu val. – *Wardenclyffe Tower*.

5 Patentēts 1969. gadā.

6 Ņemot vērā, ka induktivitātes spoles nebija vāji saistītas, bet starp tām bija stipra induktīva saite, šo sistēmu nevar saukt par bezvadu elektroenerģijas pārvades sistēmu, bet vienkārši par bezkontakta enerģijas pārvades sistēmu. [6]

Pateicoties V. Brauna veiksmīgajiem eksperimentiem, pagājušā gadsimta sešdesmito gadu beigās un septiņdesmitajos gados parādījās būtiska interese par elektroenerģijas pārvadi lielos attālumos, izmantojot mikroviļņus:

- 1968. gadā ASV zinātnieks P. Glasers publicēja zinātnisko rakstu [7] ar ambīciju koncepciju ražot elektroenerģiju kosmosā (pārveidot saules enerģiju elektriskajā enerģijā) un ar fokusētu mikroviļņu kūli pārvadīt to uz Zemi, kur ar rektenu mikroviļņu enerģiju pārveidotu elektroenerģijā;
- 1975. gadā Nacionālās Aeronautikas un Kosmosa Apgūšanas Pārvaldes⁷ pētnieki demonstrēja 34 kW jaudas pārvadi 1,54 km attālumā, izmantojot mikroviļņu kūli; [5]
- 1987. gadā projekta *SHARP* ietvaros Kanādas Komunikāciju Centrs izveidoja neliela izmēra lidmašīnas modeli, kuru varēja darbināt no Zemes, pievadot elektroenerģiju ar mikroviļņu (frekvence 2,45 GHz) palīdzību. [6]

Pagājušā gadsimta septiņdesmitajos gados tika veikti arī pirmie eksperimenti ar induktīvo BEP metodi pārvadīt lielu jaudu mazos attālumos. Tā, piemēram, 1978. gadā J. G. Bolgers (*J. G. Bolger*), F. A. Kristens (*F. A. Kristen*) un S. Ng demonstrēja induktīvo elektroenerģijas pievadi elektriskajam transportlīdzeklim. Izstrādātās induktīvās BEP sistēmas nominālā izejas jauda bija 20 kW. [8]

20. gadsimta deviņdesmitie gadi iezīmējās ar paaugstinātu interesi par elektroenerģijas pārvadi nelielos attālumos galvenokārt ar induktīvo metodi, par to liecina patentu un komercializācijas pieteikumu skaita pieaugums. Tā, piemēram, Vācu firma *Braun* sāka ražot elektriskās zobu suku ar bezvadu uzlādi. Deviņdesmitajos gados japāņu zinātnieki pievērsās elektroenerģijas pievadei kustīgiem sensoriem (piem., iebūvētiem kādā no mašīnas vai mehāniskas iekārtas kustīgām daļām) un komunikācijai ar tiem.

Līdz ar energoelektronikas attīstību un dažādu mobilo elektronisko un elektrisko iekārtu skaita palielināšanos 21. gadsimtā BEP kļuva arvien aktuālāka. Pētījumi tiek veikti galvenokārt elektroenerģijas pārvadei dažādu mobilo objektu (elektromobiļi, mobilie roboti, mobilie telefoni, droni utt.) bateriju uzlādei un elektroenerģijas pievadei sensoriem bezvadu sensoru tīklos. Spriežot pēc lielā zinātnisko rakstu un patentu skaita, 21. gadsimtā vispopulārākā ir rezonanses induktīvā metode, taču pētījumi tiek veikti arī kapacitīvās metodes, kā arī BEP ar radioviļņiem, ar gaismu (lāzeriem) un ultraskaņu. Svarīgākie sasniegumi BEP jomā 21. gadsimtā ir apkopotī 1.3. tabulā.

7 Nacionālā Aeronautikas un Kosmosa Apgūšanas Pārvalde (NASA) ir ASV valdības neatkarīgā aģentūra, kas atbildīga par civilo kosmosa programmu, aeronautiku un kosmosa izpēti.

1.3. tabula

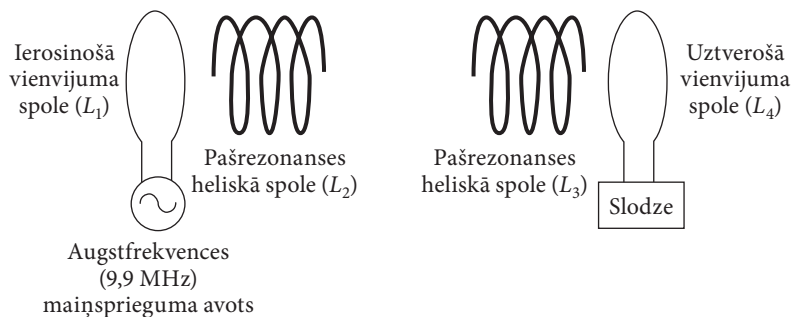
Galvenie sasniegumi BEP jomā 21. gadsimtā

Gads	Sasniegums un papildinformācija
2003.	Lai gan lāzera tehnoloģijas attīstījās jau 20. gadsimtā, tikai 2003. gadā, izdevās izveidot un demonstrēt neliela izmēra bezpilotu lidaparātu, kam enerģiju no zemes pievadīja ar lāzeru. [9] To paveica inženieri no Nacionālās Aeronautikas un Kosmosa Apgūšanas Pārvaldes. Lidmašīna bija aprīkota ar fotoelektriskiem pārveidotājiem, kas lāzera stara enerģiju pārveido elektriskajā enerģijā.
2003.	Jāpāņu zinātnieki T. Išijamas (<i>T. Ishiyama</i>) vadībā demonstrēja elektriskās enerģijas pievadi ar ultraskaņas viļņiem mazjaudas patērētājiem (0,8 W tika pārvadīti 30 cm attālumā). [12]
2007.	Lai starp spolēm panāktu daudzkārt lielāku enerģijas pārvades efektivitāti, ja attālums starp tām daudzkārt pārsniedz to rādiusu, pētnieki no Masačūsetas Tehnoloģiju Institūta (ASV) piedāvāja divu spoļu rezonanses induktīvās BEP sistēmas vietā izmantot četru spoļu BEP sistēmu (1.3. att.). Viņu izstrādātā BEP sistēma sastāvēja no divām saites spolēm (L_1 un L_4) ar rādiusu 25 cm un divām augsta labuma pašrezonanses spolēm ⁸ (rezonējošām pie frekvences 9,9 MHz) ar rādiusu 30 cm. [10] Ar šo sistēmu viņi spēja 60 W jaudu pārvadīt (līdz slodzei) attālumā, kas ir līdz pat 8 pašrezonanses spoles rādiusiem (līdz pat 2,4 m) un lietderības koeficientu starp L_2 un L_3 ap 50 % ⁹ pie 2 m attāluma. [10]
2010.	Progresīvā Zinātnes un Tehnoloģiju Institūta ¹⁰ (Dienvidkoreja) pētnieki iedarbināja pirmo elektrisko dinamiskas uzlādes transportlīdzekli, kura baterijas varēja uzlādēt, tam neapstājoties. [11]
2017.	Pētnieku komanda no Disneja Pētniecības Laboratorijas (ASV) demonstrēja 2 kW jaudas bezvadu pārvadi dažādām bezvadu elektroierīcēm (mobilie telefoni, bezvadu gaismas diožu lampas, bezvadu ventilatori utt.) metalizētā istabā ar tilpumu 54 m ³ , izmantojot kvazistatisko tilpuma rezonanses metodi (angļu val. – <i>quasistatic cavity resonance</i>). [13] Iepriekšminētā metalizētā istaba sastāvēja no metāla griestiem, grīdas un sienām; tās centrā bija izveidots vara stienis, kura spraugā tika ievietoti daži diskrētie kondensatori, un blakus stienim stāvēja ierosinoša induktivitātes spole.

8 Pašrezonanses spolēm L_2 un L_3 ārējais kondensators netika pievienots. Tās rezonēja pie 9,9 MHz, pateicoties pietiekami lielai parazitiskai kapacitātei – paškapacitātei.

9 Lietderības koeficients starp enerģijas avotu un slodzi bija tikai 15 %. [10]

10 Angļu val. – *Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)*.

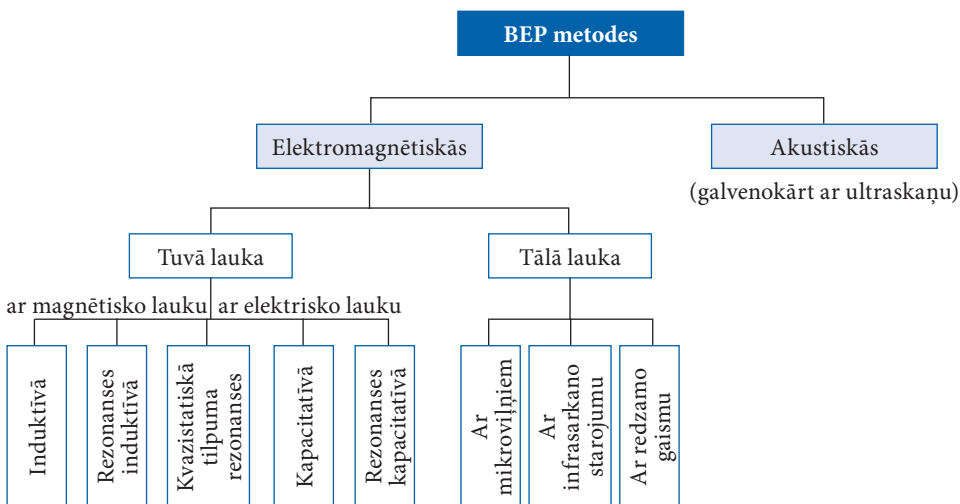


1.3. att. Masačūsetas Tehnoloģiju Institūta pētnieku slavenā 2007. gada eksperimenta shēma BEP ar 4 spolēm. Šis attēls modificētā formā ir aizgūts no [10] ar atļauju no autortiesību turētāja (*American Association for the Advancement of Science*) iegūto ar *Copyright Clearance Center* starpniecību.

1.4. BEP metožu un sistēmu klasifikācija

BEP metožu pamatklasifikācija ir redzama 1.4. attēlā. Visas BEP sistēmas var iedalīt pēc izejas jaudas līmeņa (1.4. tabula), pārvades attāluma (1.5. tabula), vadības tipa (1.6. tabula) un lietojuma (1.7. tabula).

Tuvā lauka elektromagnētiskās metodes sauc arī par bezstarojuma BEP metodēm. Atkarībā no izstarojošās ierīces veida tuvā lauka zonā dominējošs ir vai nu magnētiskais lauks, vai nu elektriskais lauks. Enerģijas pārvade notiek ar elektrisko vai magnētisko lauku. Tālā lauka BEP metodes bieži sauc arī par starojuma elektromagnētiskām BEP metodēm. Lauka zonā laikā mainīgais elektriskais un magnētiskais lauks svārstās savstarpēji perpendikulārās plaknēs un veido elektromagnētisko (EM) viļni, kas pārnēs enerģiju.



1.4. att. BEP metožu pamatklasifikācija.

1.4. tabula

BEP sistēmu iedalījums atbilstoši izejas jaudas līmenim

BEP sistēmas		
mazjaudas (<5 W)	vidējas jaudas (5 W–1 kW)	lieljaudas (>1 kW)

1.5. tabula

BEP sistēmu iedalījums atbilstoši pārvades attālumam

BEP sistēmas		
maza attāluma (<1 m)	vidēja attāluma (1–5 m)	liela attāluma (>5 m)

1.6. tabula

BEP sistēmu iedalījums atbilstoši vadības tipam

BEP sistēmas		
ar nenoslēgtu vadības kontūru (<i>open loop</i>)	ar noslēgtu vadības kontūru (<i>closed loop</i>)	
	Ar atgriezenisko saiti starp primāro un sekundāro daļu	Ar atgriezenisko saiti primārajā un/vai sekundārajā daļā

1.7. tabula

BEP sistēmu iedalījums atbilstoši lietojumam

BEP sistēmas				
industriāliem lietojumiem	sadzīves lietojumiem	militāriem lietojumiem	medicīnas lietojumiem	transportam

1.5. BEP lietojumi

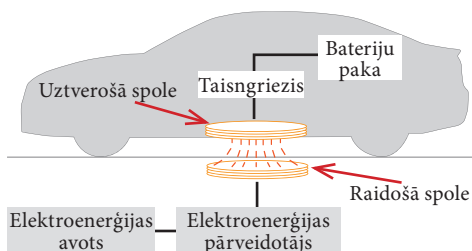
BEP lietošana galvenokārt saistīta ar elektroiekārtu bateriju bezvadu uzlādes iekārtām dažādās cilvēku darbības sfērās. Tās var lietot arī tiešai elektroenerģijas pārvadei, lai nodrošinātu nepārtrauktu elektroiekārtas darbību.

Lietošana transportā

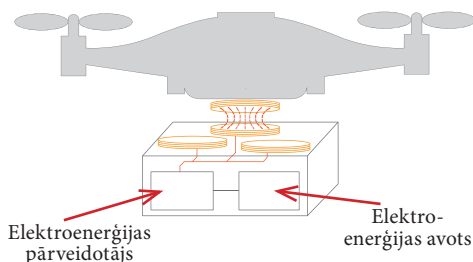
Viena no vissvarīgākajām BEP lietošanas sfērām, protams, ir elektrotransporta, gan lieljaudas, gan arī vidējas jaudas; gan sauszemes, gan ūdens, gan arī gaisa (1.5. att.). BEP ir ērts un drošs paņēmieni, kā uzlādēt elektrotransporta akumulatoru baterijas, ne tikai tam apstājoties, bet arī esot kustībā (tā sauktā bateriju dinamiskā bezvadu uzlāde). Lai pārvadītu elektroenerģiju sauszemes un ūdens transportam, nav nepieciešami lieli attālumi (parasti līdz 50 cm), tāpēc visbiežāk lieto rezonanses induktīvo metodi.

Teorētiski iespējama arī nepārtraukta elektroenerģijas pārvade lielos attālos bezpilotu lidmašīnām no zemes vai lidmašīnu bateriju uzlāde no zemes ar tālā lauka metodēm (optiskais starojums vai mikroviļņi), taču pagaidām šis lietošanas virziens ir eksperimentu stadijā [9] galvenokārt tāpēc, ka lieljaudas mikroviļņu vai optiskais starojums var būt ļoti kaitīgs dzīvām būtnēm (cilvēkiem, dzīvniekiem u. c.).

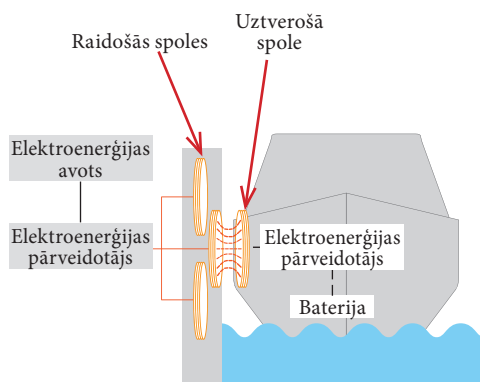
a) elektromobiļa baterijas bezvadu uzlāde



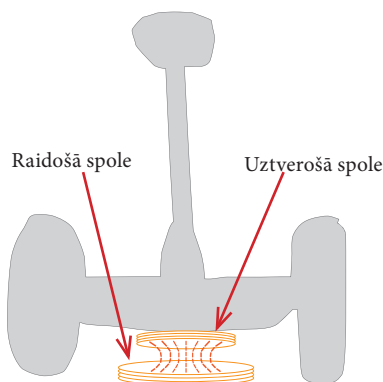
b) kravas vai militārā drona baterijas bezvadu uzlāde lidojuma laikā



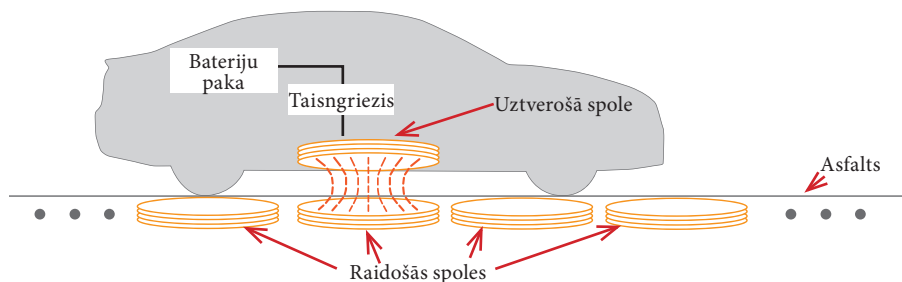
c) elektrokuģa baterijas bezvadu uzlāde



d) giroskūtera baterijas bezvadu uzlāde



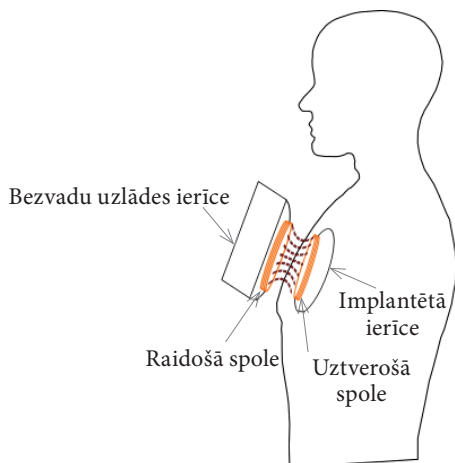
e) elektromobiļa bateriju bezvadu dinamiskā uzlāde



1.5. att. Piemēri BEP (ar rezonanses induktīvo metodi) lietošanai transportā. Piezīme: attēli a un e adaptēti no [45].

Lietošana medicīnā

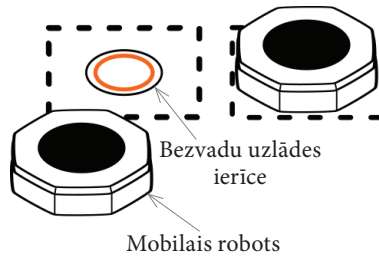
Līdz ar pieaugošo tendenci uzlabot slimu cilvēku dzīves kvalitāti un ilgumu, 21. gadsimtā strauji attīstās progresīvā medicīniskās elektronikas apakšnozare “Biomedicīnas implantētās elektroniskās ierīces”. Šīs ierīces, ko implantē slimu cilvēku ķermenī, ir nepieciešamas, lai monitorētu slimus iekšējos orgānus, palīdzētu tiem normāli darboties un pat terapeitiski ārstētu tos, piem., sirdi. Bieži šīs ierīces (piem., kardiostimulatori) tiek darbinātas ar baterijām, kuras laiku pa laikam jāuzlādē, taču tas saistīts ar ķirurģisku operāciju un var pasliktināt cilvēka veselības stāvokli vēl vairāk. Lai uzlādētu šo ierīču baterijas, neveicot ķirurģisku operāciju, mūsdienās implantētām ierīcēm lieto BEP (1.6. att.), piem., ar magnētisko lauku. BEP sistēmas sekundāro daļu ievieto ierīcē, ko implantē cilvēka ķermenī, bet primārā daļa paliek ārpus tā. Primārā daļa rada laikā mainīgu magnētisko lauku, kuru uztver uztverošā spole (implantēta cilvēka ķermenī) un implantētais miniatūrais elektroenerģijas pārveidotājs uzlādē bateriju.



1.6. att. Piemērs BEP (ar rezonanses induktīvo metodi) lietošanai medicīnā: BEP kardiostimulatoram.

Lietošana industrijā

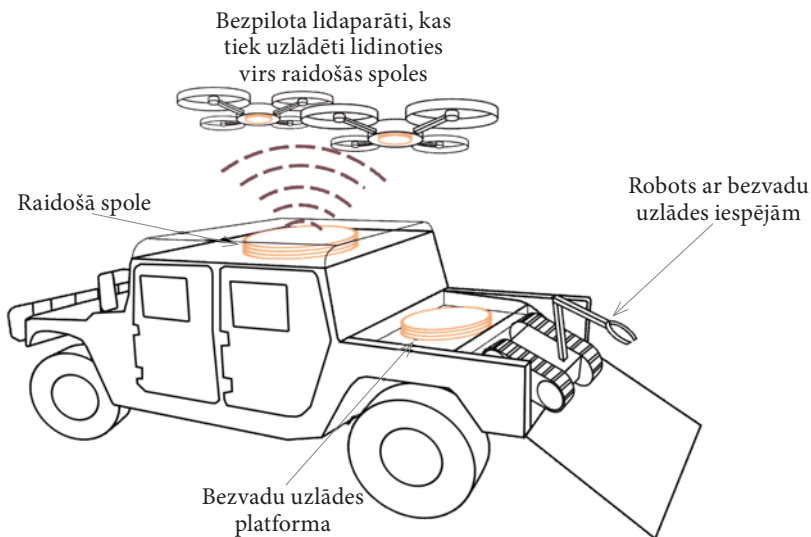
Svarīga nozīme BEP ir arī ražošanā un noliktavu saimniecībā. Mūsdienās ļoti populāri ir mobilie roboti, kas, piem., var transportēt dažādas preces vai detaļas noliktavās un cehos. Šiem robotiem ir baterijas un tās laiku pa laikam automātiski jāuzlādē. Vislabākais variants, kā to izdarīt automātiskā režīmā, protams, ir izmantot bezvadu uzlādi (1.7. att.). Kā citu spožu BEP industriālā lietojuma piemēru var minēt bezvadu enerģijas pievadi sensoriem, kas atrodas dažādu mašīnu kustīgās daļās. BEP var būt ļoti noderīga arī enerģijas pievadei industriāliem bezvadu sensoru tīkliem.



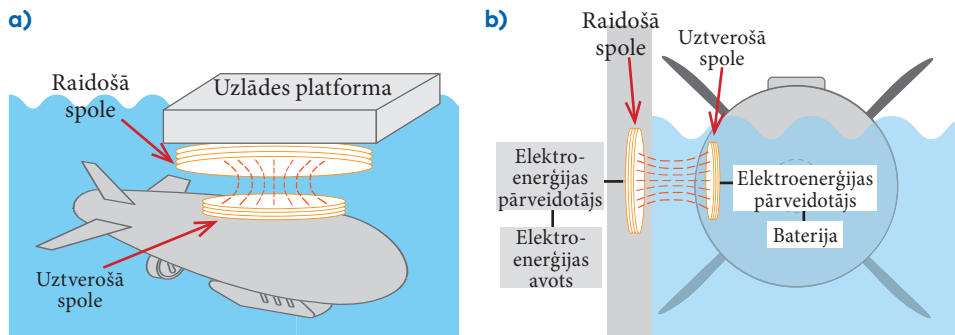
1.7. att. Piemērs BEP (ar rezonanses induktīvo metodi) lietošanai industrijā: mobilo robotu bateriju bezvadu uzlāde.

Lietošana militārām vajadzībām

Mobilos robotus un bezpilota lidaparātus var izmantot arī militāru uzdevumu veikšanai. Ja tie strādā automātiskā režīmā liela mitruma apstākļos, ērtāk un drošāk lietot bateriju bezvadu uzlādi, kā tas parādīts 1.8. attēlā. BEP var lietot arī zemūdens bezpilotu aparātu bateriju automātiskai uzlādei (1.9. att.). Tas ir ne tikai ērts, bet arī drošs paņēmieni, it īpaši, ja uzlāde notiek jūras ūdenī, kas ir strāvu vadošs.



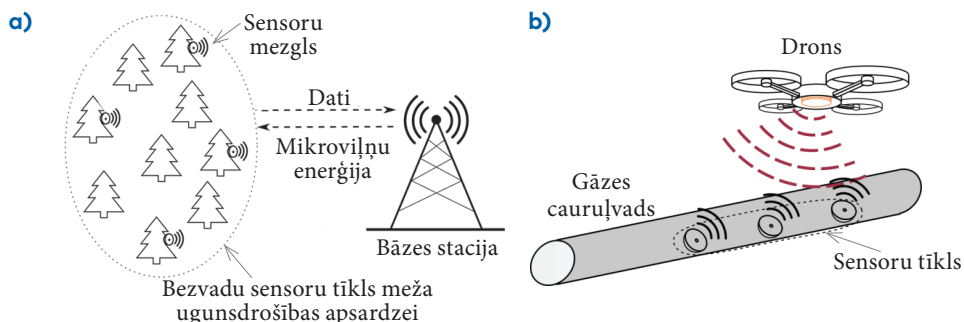
1.8. att. Piemērs BEP lietošanai militārā jomā: dronu bateriju bezvadu uzlāde, tiem lidinoties virs uzlādes platformas. Šis attēls modificētā formā ir aizgūts no [6] ar atļauju no autortiesību turētāja (*Cranfield University*).



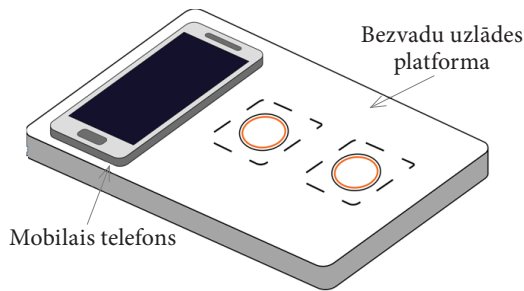
1.9. att. Bezpilota zemūdens aparāta bateriju uzlāde, tam atrodoties ūdenī.

Lietošana bezvadu sensoru tīklos

Mūsdienās bezvadu sensoru tīkli ir ļoti aktuāli. Tie sastāv no vairākiem bezvadu sensoru mezgliem (sensors ar raidītāju-uztvērēju datu pārraidei, vadības ierīce un enerģijas avots), kuri var komunicēt cits ar citu un bāzes staciju un ir paredzēti vides stāvokļa monitorēšanai, datu kolekcijai un sūtīšanai uz bāzes staciju. Bezvadu sensoru tīklus lieto telpas apgabala monitorēšanai (piem., naftas un gāzes cauruļvadi), cilvēka veselības stāvokļa, gaisa piesaņojuma un ūdens kvalitātes monitorēšanai, mežu ugunsgrēku konstatēšanai, mašīnu defektu diagnostikai u.c. Bezvadu sensoru mezgliem parasti ir baterijas, kas laiku pa laikam jānomaina vai jāuzlādē. Bateriju nomaiņa vai uzlāde, izmantojot tradicionālās metodes, nav ērta un dažreiz var būt pat apgrūtināša. Tāpēc, lai atvieglotu sensoru mezglu bateriju uzlādi, var izmantot BEP, piem., izmantojot mikroviļņus, kurus izstaro bezvadu sensoru tīkla bāzes stacija un vienlaikus veic datu vākšanu no sensoru mezgliem (1.10. att. a). Ja bezvadu sensoru tīkls atrodas pietiekami lielā attālumā no bāzes stacijas vai ja mikroviļņu izplatīšanai ir daudz šķēršļu, kas var izraisīt lielus enerģijas pārvades zudumus, tad baterijas sensoru mezglos var uzlādēt ar droniem (1.10. att. b), kas ir aprīkoti ar bateriju bezvadu uzlādes ierīcēm (enerģijas pārvade no drona līdz sensora mezgliem notiek ar laika mainīgu magnētisko lauku).



1.10. att. BEP bezvadu sensoru tīklam. Piezīme: 1.10. att. a modificētā formā aizgūts no [44] ar atļauju no autortiesību turētājiem (raksta autoriem), bet 1.10. att. b – no [6] ar atļauju no autortiesību turētājiem (Cranfield University).



1.11. att. Mobilo telefonu bezvadu uzlāde.

Citi lietojumi

BEP nereti lieto arī mājas apstākļos bateriju bezvadu uzlādei mobilām elektroniskām ierīcēm, piemēram, mobilajiem telefoniem (1.11. att.). Arvien biežāk restorānos un lidostās ir izvietoti galdi ar iebūvētu bezvadu uzlādes sistēmas primāro daļu – mobilo ierīču uzlādei. Mājas putekļusūcējiem – robotiem – arī ir bezvadu uzlādes stacija.

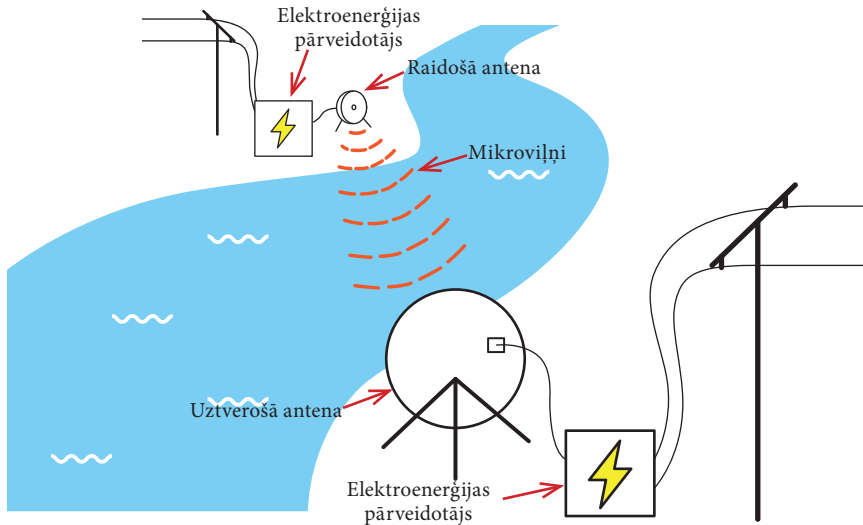
Iespējami, bet līdz galam neizstrādāti lietojumi

Šajā sadaļā iepriekš aplūkoti BEP lietojumi ir reāli eksistējoši jau šodien. Taču var turpināt aplūkot arī vēl citus BEP lietojumus.

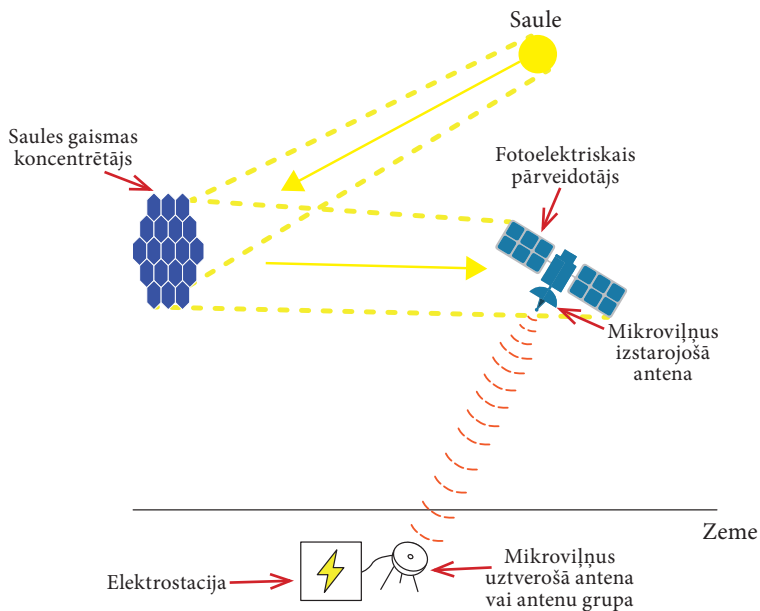
- Elektroenerģijas bezvadu pārvade ar mikroviļņiem (vai optisko starojumu) no vienas upes krasta līdz otram (1.12. att. a). Šis enerģijas pārvades paņēmiens varētu būt pievilcīgāks, piemēram, no zemāku izmaksu viedokļa (ja upe ir ļoti plata), bet tā trūkumi ir zemāks lietderības koeficients un negatīva ietekme uz dzīvīem organismiem (ja tie uzturas darba zonā).
- Elektroenerģijas pievade lidaparātiem no zemes ar mikroviļņiem vai optisko starojumu. Kaut gan šis lietojums teorētiski iespējams, taču dēļ lielās intensitātes mikroviļņu vai optiskā starojuma negatīvās ietekmes uz dzīvīem organizmiem šāds enerģijas pievades paņēmiens nav vēlam.
- Elektroenerģijas ražošana kosmosā un BEP ar mikroviļņiem uz Zemi (1.12. att. b). Satelīti (atrodas Zemes ģeostacionārās orbītās) ir aprīkoti ar fotoelektriskajiem elementiem (saules paneļiem) un pārveido Saules enerģiju elektriskajā, kuru elektroenerģijas pārveidotāji pārveido mikroviļņu enerģijā un ar paraboliskām mikroviļņu antenām nogādā uz Zemes, kur atrodas mikroviļņu enerģijas savākšanas punkti (elektrostacijas), aprīkoti ar uztverošām lielas jaudas mikroviļņu antenām un iegūtās enerģijas pārveidotājiem. Minēto ambiciozo “Saules enerģētikas” koncepciju pirmo reizi 1968. gadā izstrādāja ASV zinātnieks P. Glasers (*P. Glaser*). [7] Lai gan ražot elektroenerģiju kosmosā un pārvadīt to uz Zemi teorētiski ir iespējams, tomēr pagaidām šis ambiciozais projekts netiek realizēts, galvenokārt dēļ ļoti

lielajām izmaksām un lielas intensitātes mikroviļņu negatīvās ietekmes uz dzīvjiem organismiem.

a) enerģijas pārvade ar mikroviļņiem no viena upes krasta līdz otram



b) elektroenerģijas ražošana kosmosā un BEP uz Zemi



1.12. att. Daži iespējami, bet līdz galam neizstrādāti BEP lietojumi. Piezīme: 1.12. att. a modificētā formā aizgūts no [23], bet 1.12. att. b – no [14] ar atļaujām no autortiesību turētājiem (rakstu autoriem).

1.6. BEP standarti

1.6.1. Svarīgākie BEP standarti

Lai ar vienu bezvadu uzlādes ierīci varētu uzlādēt dažādas viena tipa elektroniskās vai elektriskās iekārtas,¹¹ kā arī lai atbilstu elektromagnētiskās saderības standartu prasībām, dažādas organizācijas ievieš savus BEP standartus. Pirmās četras lielākās organizācijas, kuras piedāvāja BEP standartus, bija Bezvadu Enerģijas konsorcijs (*Wireless Power Consortium (WPC)*), Jaudas Jautājumu alianse (*Power Matters Alliance (PMA)*)¹², Bezvadu Enerģijas alianse (*Alliance for Wireless Power (A4WP)*)¹³ un Automobiļu Inženieru biedrība (*Society of Automotive Engineers (SAE)*).

Bezvadu Enerģijas konsorcijs tika izveidots ar nolūku radīt vienotu bateriju bezvadu uzlādes standartu, kuru varētu izmantot dažādu ražotāju mobilajām elektroniskajām ierīcēm. [16] Ņemot vērā, ka Bezvadu Enerģijas un Jaudas Jautājumu alianse atsevišķi nebija spējīgas pilnvērtīgi konkurēt ar Bezvadu Enerģijas konsorciju, tās apvienojās un izveidoja “Gaisa Degvielas” aliansi (*AirFuel Alliance (AFA)*). Tās mērķis ir attīstīt induktīvās un rezonanses induktīvās BEP tehnoloģijas, izstrādājot jaunus standartus un paātrinot to ieviešanu, kā arī sniegt pilnvērtīgas iespējas izmantot bezvadu uzlādi dažādās sabiedriskās vietās. [15] Ja uz bezvadu uzlādes ierīces ir *AirFuel Alliance* logo (1.13. att.), tad ar to var uzlādēt jebkuru elektronisko ierīci, kas neatkarīgi no ražotāja atbalsta tās standartus.

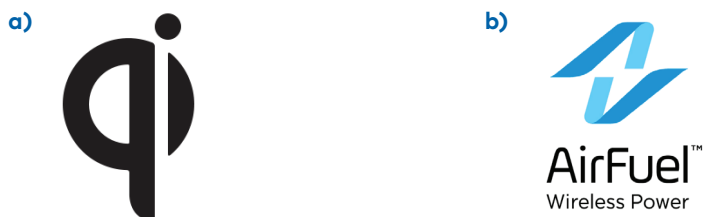
Savukārt Automobiļu Inženieru biedrības standarts SAE-J2954 tika izveidots ar nolūku attīstīt vieglo elektromobiļu sadarbību ar rezonanses induktīvajām bezvadu uzlādes ierīcēm. SAE-J2954 ietver tādas nozīmīgas parametrus kā bezvadu uzlādes ierīču jaudas klases, rekomendējama darba frekvenču diapazons, minimālais lietderības koeficients, izstaroto elektromagnētisko traucējumu līmeņu maksimāli pieļaujamās vērtības, rekomendējamo diapazonu attālumam starp bezvadu uzlādes ierīci un elektromobiļa apakšdaļu utt. [26] Sākumā šis standarts bija aktuāls ASV, taču vēlāk kļuva starptautisks.

Nozīmīgākie BEP standarti ir apkopoti 1.8. tabulā, bet 1.14. att. hronoloģiskā secībā parādīta BEP standartu un organizāciju izveidošana. Savukārt 1.13. att. redzami WPC Qi standarta un AFA standarta logo.

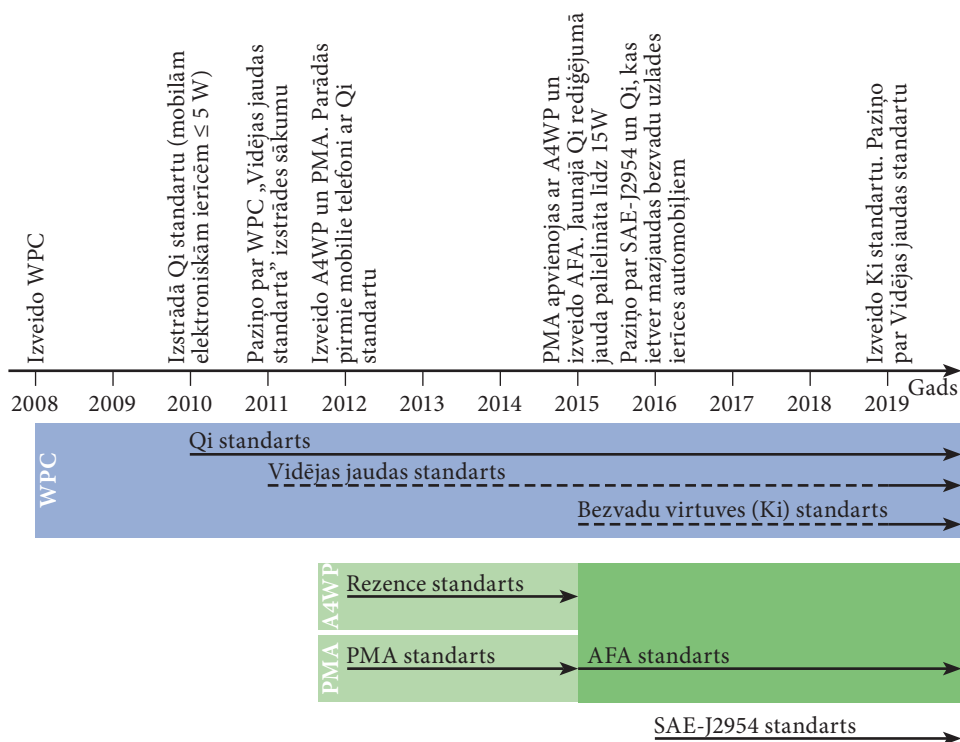
11 Piemērs. Ir ļoti daudz mobilu telefonu ražotāju un modeļu un, ja netiks ievērots kāds no BEP standartiem, tad katram mobilā telefona modelim būs nepieciešama sava bezvadu uzlādes ierīce ar konkrētām specifikācijām un citu telefonu modeļiem tā nebūs lietojama. Ņemot vērā, ka visi telefonu ar bezvadu uzlādes iespējām ražotāji pakļaujas vienotam BEP standartam (piem. Qi standartam), tad vienu un to pašu standartizēto bezvadu uzlādes ierīci var izmantot visiem mobilajiem telefoniem ar bezvadu uzlādes iespējām.

12 Šo aliansi dibināja divas organizācijas – *Procter & Gamble* un *Powermat Technologies*. Misija bija attīstīt BEP standartus un protokolus induktīvai (vai rezonanses induktīvai) mobilu elektronisko ierīču bateriju uzlādei kHz diapazonā. [20] Alianses dibinātāji vēlējās izveidot labākus BEP risinājumus nekā piedāvāja WPC.

13 *A4WP* tika dibināta ar mērķi radīt jaunu BEP standartu ar dažiem papildinājumiem, kas nebija ietverti Qi standartā. Šo standartu nosauca par *Rezence*.



1.13. att. Qi [16] un AFA [15] standartu logo.



1.14. att. BEP standartu un organizāciju izveides hronoloģiskā secība.

Piezīme: pārtrauktā līnija nozīmē „izstrādes stadijā”.

1.6.2. Citi ar BEP saistīti standarti

Ja kāda no bateriju bezvada uzlādes ierīcēm vai BEP sistēmām neatbilst kādam no pastāvošajiem BEP standartiem, tad tai obligāti jāatbilst kādam starptautiskajam vai nacionālajam elektromagnētiskās saderības (EMS) un elektromagnētiskās drošības (EMD) standartam, lai BEP sistēmas netraucētu bezvadu sakaru ierīcēm un citām jutīgām elektroniskām ierīcēm, kā arī lai tās nebūtu kaitīgas cilvēka

organismam. EMS standarti nosaka, kādos frekvenču diapazonos atļauts strādāt BEP sistēmām, kā arī maksimāli pieļaujamās vadāmības un izstaroto traucējumu līmeņus norādītajā frekvenču diapazonā.

Ja BEP sistēmas izmanto industrijā, zinātnē vai medicīnā¹⁴ (IZM), tad tām jāatbilst CISPR¹⁵ 11 standartam, kas nosaka IZM elektroiekārtu vadāmības un izstaroto traucējumu mērīšanas metodes, mēraparātus, robežvērtības traucējumu līmeņiem un to interpretāciju. CISPR 11 arī nosaka, kādā frekvenču diapazonā atļauts strādāt BEP sistēmām. Tā, piemēram, elektrotransportlīdzekļu BEP sistēmām jāatbilst otrās grupas CISPR 11 standarta prasībām, kurās par atļautu frekvenču diapazonu elektrotransportlīdzekļu BEP sistēmām (ar jaudu līdz 7 kW) noteikts diapazons 79–90 kHz¹⁶. [24] Savukārt MHz diapazonā CISPR 11 ļauj strādāt tikai mazjaudas BEP sistēmām ar frekvenci $6,78 \pm 0,015$ vai $13,56 \pm 0,007$ MHz. CISPR 11 detalizēta specifikācija ir pieejama internetā <https://webstore.iec.ch/publication/22643>. Šī standarta Eiropas Savienības ekvivalents ir EN 55011.

Ņemot vērā, ka ASV, Ķīnā, Japānā un Dienvidkorejā BEP joma ir ļoti aktuāla, šajās valstīs tika izstrādāti un ieviesti savi EMS standarti. ASV izmantojamām BEP sistēmām jāatbilst Federālās Komunikāciju Komisijas¹⁷ standartam Nr. 15 vai Nr. 18. Ķīnā izmantojamām – jāatbilst Ķīnas Komunikāciju Standartu asociācijas standartu prasībām. Dienvidkorejā Telekomunikāciju Tehnoloģiju asociācija (*Telecommunication Technology Association (TTA)*) nosaka frekvenču diapazonus, kuros atļauts darboties BEP sistēmām, kā arī nominālo izejas jaudu. Tā, piemēram, TTA nosaka frekvenču diapazonu 19–21 kHz un 59–61 kHz BEP sistēmu lietošanai smagā elektrotransporta (elektrotraktori, elektroautobusi utt.) statistiskai vai dinamiskai bateriju bezvadu uzlādei. [25] Savukārt Japānā aktīvi darbojas Radio Industrijas un Biznesa asociācija (*Association of Radio Industries and Businesses (ARIB)*), kas izstrādāja standartu rezonanses induktīvām BEP sistēmām ar jaudu līdz 7,7 kW un standartu kapacitīvām BEP sistēmām ar nominālo jaudu līdz 100 W. [25] ARIB pieļauj kapacitīvām BEP sistēmām darboties frekvenču diapazonā 425–524 kHz. [25]

Ņemot vērā, ka BEP sistēmu izstarotie EM lauki var būt kaitīgi cilvēka organismam, izstrādājot BEP sistēmas, jāņem vērā arī Starptautiskās komisijas aizsardzībai pret nejonizējošo starojumu (SKANS)¹⁸ vadlīnijas un rekomendācijas. SKANS publicējusi divas vadlīnijas (1998. g. [27] un 2010. g. [28]) par EM lauku iedarbību uz cilvēku veselību. Šīs vadlīnijas galvenokārt apraksta laikā mainīgu elektrisko un magnētisko lauku robežlīmeņus.

14 Angļu valodā šīs nozares kopā apzīmē ar saīsinājumu ISM jeb *Industrial, Scientific, Medicine*.

15 Saīsinājums CISPR franču valodā nozīmē *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*, latviešu valodā tas ir „Starptautiskā īpašā radiotraucējumu komiteja”.

16 Šajā diapazonā maksimāli pieļaujamais magnētiskā lauka intensitātes līmenis ir daudzkārt lielāks nekā ārpus tā.

17 Federālā Komunikāciju Komisija angļu valodā ir *Federal Communication Commission (FCC)*.

18 Angļu val. – *The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*.

1.8. tabula

Svarīgākie BEP standarti un organizācijas [15] – [21], [26]

Organizācija	Bezvadu Enerģijas konsorcijs			Jaudas Jautājumu alianse	Bezvadu Enerģijas alianse	Gaisa Degvielas alianse	Automobiļu Inženieru biedrība
Organizācija (angļu val.)	Wireless Power Consortium (WPC)			Power Matters Alliance (PMA)	Alliance for Wireless Power (A4WP)	AirFuel Alliance (AFA)	Society of Automotive Engineers (SAE)
BEP standarts	Qi ¹⁹	Vidējās Jaudas standarts ²⁰	Ki ²¹	PMA standarts	Rezence	AFA standarts	SAE-J2954
Statuss	Aktīvi			Nav aktīvi		Aktīvs	Aktīvs
Lādējamās ierīces	Mobilas elektroniskās ierīces	Portatīvie elektroinstrumenti, putekļu sūcēji-roboti, bezpilotu lidaparāti utt.	Virtuves elektroierīces	Mobilas elektroniskās ierīces	Mobilas elektroniskās ierīces, mazjaudas droni un mazjaudas mobilie roboti		Vieglo elektromobiļu baterijas
BEP metode	Rezonanses induktīvā			Rezonanses induktīvā		Rezonanses induktīvā	
Lādēšanas jauda	≤30 W	30–65 W (plānots 200 W)	0,2–2,2 kW	≤10 W	≤50 W		3,7; 7 un 11 kW
Attālums starp lādētāju un uzlādes ierīci	Līdz 4 cm		Nav zināms	Līdz 5 cm		Līdz 25 cm	
Darba frekvenču diapazons	87–205 kHz		Nav zināms	277–357 kHz	6,78 MHz±15 kHz		81,38–90 kHz
Komunikācijas veids starp primāro un sekundāro daļu	Caur uztverošo un raidošo spoli ²²			Nav zināms	Bluetooth (2,4 GHz)		Nav zināms
Papildinformācija	Lai kādam elektroniskam produktam varētu piešķirt Qi standartu, tā atbilstība ir jātestē WPC sertificētā laboratorijā. Informācija par elektroniskiem produktiem, kas atbilst Qi standarta prasībām, ir brīvi pieejama WPC mājaslapā.				Augstāka telpiskā brīvība ²³ ; iespēja ar 1 bāzes uzlādes staciju vienlaikus pievadīt enerģiju vairāk nekā 1 mobilai ierīcei. ²⁴		

19 Qi ir aizgūts no tradicionālās ķīniešu valodas un tas jālasa kā „či”.

20 Angļu val. – *Medium Power standard*.

21 Ki standartu sauc arī par Bezvadu Virtuves standartu (angļu val. – *Cordless Kitchen standard*).

22 Pateicoties uztverošās spoles strāvas modulācijai un raidošās spoles strāvas demodulācijai.

23 BEP sistēmai ar augstu telpisko brīvību uztverošās un raidošās spoles centru savstarpējā nobīde daudzā mazāk ietekmē sistēmas lietderības koeficientu un jaudas pārvadi nekā BEP sistēmai ar zemu telpisko brīvību. MHz diapazonā augsta telpiskā brīvība ir vieglāk sasniedzama nekā pie kHz.

24 Bija iespēja vienlaikus pārvadīt enerģiju līdz pat 8 mobilajām ierīcēm. [18]

2. BEZVADU ELEKTROENERĢIJAS PĀRVADES METODES

Šajā sadaļā aplūkotas dažādas BEP metodes: induktīvā metode, rezonanses induktīvā metode, kvazistatiskā tilpuma rezonanses metode, kapacitatīvā metode, pārvade ar mikroviļņiem, ar optisko starojumu un akustiskās metodes.

2.1. Induktīvā pārvades metode

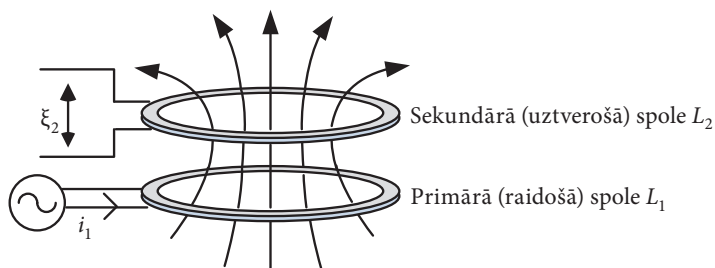
BEP induktīvā metode ir balstīta uz laikā mainīga magnētiskā lauka izmantošanu. Iedomāsimies divas induktīvi saistītas spoles, kuras atrodas nelielā attālumā viena no otras (2.1. att.). Pieņemsim, ka caur pirmo spoli plūst maiņstrāva. Elektroenerģijas pārvade starp šīm spolēm ir iespējama, pateicoties divām svarīgām parādībām.

1. Maiņstrāva, plūstot caur primārās (raidošās) induktivitātes spoles L_1 tinumu, rada laikā mainīgu magnētisko plūsmu.
2. Elektromagnētiskās indukcijas parādība: elektrodzinēj spēka (EDS, ξ_2) inducēšana sekundārajā (uztverošā) spolē L_2 , ja caur šīs spoles ierobežotās virsmas laukumu plūst laikā mainīga magnētiskā plūsma $\Phi_{\text{mag}}(t)$:

$$\xi_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{\text{mag}}(t)}{dt}, \quad (2.1.)$$

kur N_2 – sekundārās spoles tinumu skaits.

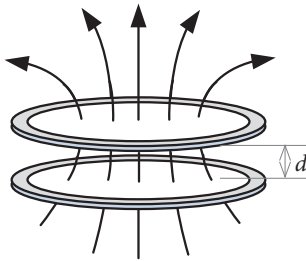
Jo straujāk mainās magnētiskā plūsma un jo lielāka ir tās amplitūda, jo lielāks EDS inducēsies sekundārajā spolē. Citiem vārdiem sakot, jo augstāka ir primārās spoles strāvas frekvence un jo tuvāk sekundārā spole atrodas primārajai spolei (un jo mazāk spoļu centri ir nobīdīti viens pret otru), jo lielāks EDS inducēsies sekundārajā spolē.



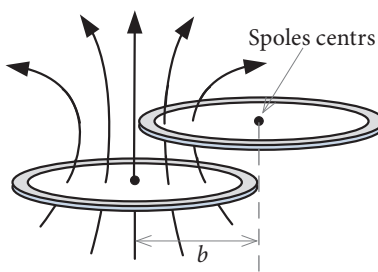
2.1. att. Divas induktīvi saistītas spoles, kas atrodas nelielā attālumā viena no otras.

Induktīvo saiti starp abām spolēm raksturo saites koeficients k , kura vērtība var būt diapazonā no 0 līdz 1. Ja saites koeficients ir 1, tad visas primārās spoles radītās magnētiskā lauka spēka līnijas šķērso sekundārās spoles ierobežotās virsmas laukumu, bet, ja $k=0$, tad neviena magnētiskā lauka spēka līnija nešķērso L_2 ierobežotās virsmas laukumu. 2.2. att. uzskatāmi parādīti gadījumi, kad starp induktīvi saistītām spolēm ir vāja vai spēcīga induktīvā saite.

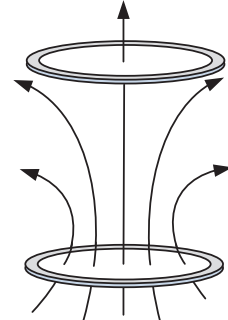
a) spēcīgas saites piemērs



b) vājas saites piemērs



c) vājas saites piemērs



2.2. att. Induktīvi saistītas spoles: a – spēcīgas saites piemērs (spoļu centri sakrīt un attālums starp tām daudzkārt mazāks par spoļu diametru); b – vājas saites piemērs (spoļu centri ir būtiski nobīdīti viens pret otru); c – vājas saites piemērs (spoļu centri nav nobīdīti, bet attālums starp spolēm ir daudzkārt lielāks par spoļu diametru).

Saites koeficientu ietekmē attālums starp spolēm d , spoļu ģeometriskie izmēri, spoļu centru savstarpējā nobīde b , vides (kurā izplatās magnētiskais lauks) relatīvā magnētiskā caurlaidība un spoļu ferīta paplāksnes (ja tāda ir) magnētiskie parametri. Pieaugot attālumam starp spolēm un spoļu tinumu centru nobīdei, k samazinās. Pietiekami lielu k var sasniegt, ja spoļu centri nav būtiski nobīdīti un attālums starp spolēm ir daudzkārt mazāks par spoļu diametru.

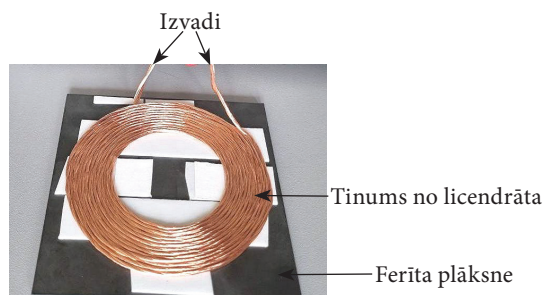
Ar saites koeficientu tieši saistīta mijinduktivitāte (M) starp induktīvi saistītām spolēm. Pēc definīcijas mijinduktivitāte ir proporcionalitātes koeficients starp strāvu primārajā kontūrā (piem., spolē) un magnētisko plūsmu, kas šķērso sekundārā kontūra (piem., spoles) ierobežotās virsmas laukumu. No mijinduktivitātes definīcijas un no (2.1.) seko, ka divu induktīvi saistītu spoļu gadījumā mijinduktivitāte starp tām ir proporcionalitātes koeficients starp strāvas izmaiņas ātrumu raidošajā spolē un inducēto EDS uztverošajā spolē:

$$\xi_2 = -M \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (2.2.)$$

Saites koeficients un mijinduktivitāte ir saistīti lielumi:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}. \quad (2.3.)$$

Lai magnētisko lauku koncentrētu darba zonā starp raidošo un uztverošo spoli, BEP sistēmas spolēm parasti viens vai vairāki tinuma slāņi ir pievienoti ferīta paplāksnei (2.3. att.). Paplākšņu izmantošana ļauj samazināt primārās spoles izkliedes laukus (kas nav saķēdēti ar sekundāro spoli) un paaugstināt saites koeficientu (pie tāda paša attāluma starp spolēm). Ferīta paplāksnes kalpo arī par magnētisku ekrānu, kas būtiski aizsargā apkārtējo telpu no laikā mainīgā magnētiskā lauka. Ferītiem labas ekranēšanas īpašības piemīt relatīvi zemās frekvencēs. Augstākās frekvencēs (MHz diapazonā) bieži lieto spoles bez magnētiskā materiāla pamatnes, jo šajā diapazonā enerģijas zudumi ferītos (un citos magnētiskos materiālos) būtiski pieaug. MHz diapazonā ir nepieciešamas spoles ar pietiekami mazu induktivitāti, kuras var pietiekami vienkārši izveidot, neizmantojot magnētiskos materiālus. Plakanām apaļām spolēm vai spirālspolēm tinumu parasti izveido (izkodina vai izfrēzē) uz stikla tekstolīta pamatnes. MHz diapazonā izmantojamo raidošo un uztverošo spoļu tinumu konfigurācijas ir parādītas 2.4. attēlā.

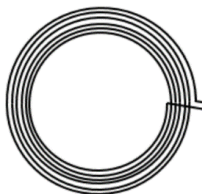


2.3. att. Tradicionāla BEP spole (paredzēta kHz diapazonam) ar ferīta paplāksni. Attēls ir aizgūts modificētā formā no [38] ar atļauju no autortiesību turētāja.

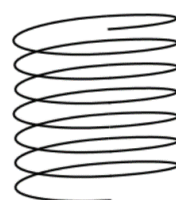
a) plakana spirālspole



b) apaļa spole



c) heliska spole

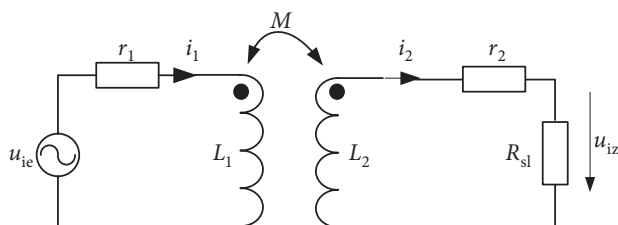


2.4. att. MHz BEP sistēmu raidošo/uztverošo spoļu tinumu konfigurācija. Attēli ir aizgūti no [33] ar atļauju no autortiesību turētāja (raksta autoriem).

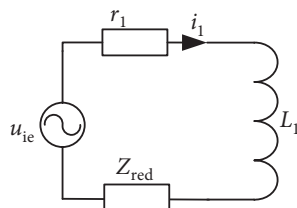
Vienkāršo BEP induktīvo sistēmu var aizvietot ar ekvivalento shēmu, kas grafiski attēlota 2.5. attēlā. BEP induktīvo sistēmu induktīvi saistītās spoles var aizvietot ar bezserdes transformatoru, kura saites koeficients ir ievērojami zemāks

nekā tradicionālajam transformatoram ar magnētisko serdi.²⁵ Rezistors ar aktīvo pretestību r_1 ietver zudumus²⁶ raidošajā spolē L_1 un vadītājos primārajā kontūrā, kā arī ieejas avota iekšējo pretestību. Savukārt rezistors ar aktīvo pretestību r_2 ietver zudumus uztverošajā spolē L_2 un vadītājos sekundārajā kontūrā. Lai vienkāršotu analīzi, šeit ir pieņemts, ka avota ieejas spriegums ir sinusoidāls.²⁷

a) vienkāršas BEP inductīvās sistēmas ekvivalentā shēma



b) uz raidošo (primāro) pusi reducēta BEP inductīvās sistēmas ekvivalentā shēma



2.5. att. Ekvivalentās shēmas.

Mainstrāvai i_1 plūstot caur raidošo spoli, veidojas laikā mainīga magnētiskā plūsma un, šķērsojot katru raidošās spoles vijumu, inducē tajā pašindukcijas EDS, kas ir proporcionāls i_1 frekvencei, L_1 un i_1 amplitūdai. Daļa no i_1 radītās plūsmas šķērso uztverošo spoli un inducē tajā EDS, kas ir proporcionāls i_1 frekvencei, mijinduktivitātei (un saites koeficientam) starp abām spolēm un i_1 amplitūdai. Savukārt uztverošajā spolē plūstošā mainstrāva i_2 , šķērsojot katru uztverošās spoles vijumu, inducē tajā pašindukcijas EDS, kas ir proporcionāls i_2 frekvencei, L_2 un i_2 amplitūdai. Daļa no i_2 radītās plūsmas šķērso raidošo spoli un inducē tajā EDS, kas ir proporcionāls i_2 frekvencei, mijinduktivitātei un i_2 amplitūdai. Matemātiski iepriekš teikto var aprakstīt ar vienādojumu sistēmu: [46]

$$\begin{cases} \dot{U}_{ie} = \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1) - j\omega M \dot{I}_2, \\ j\omega M \dot{I}_1 = \dot{I}_2 (r_2 + j\omega L_2 + R_{sl}) \end{cases} \quad (2.4)$$

kur \dot{U}_{ie} – ieejas sprieguma kompleksā amplitūda;

\dot{I}_1 un \dot{I}_2 – attiecīgi primārās un sekundārās strāvas kompleksā amplitūda;

ω – ieejas maiņsprieguma cikliskā jeb leņķiskā frekvence, kas ir vienāda ar $2\pi f$ (kur f ir frekvence).

Risinot vienādojumu sistēmu (2.4.), var iegūt izteiksmi BEP sistēmas parametriem, tādiem kā kompleksais sprieguma pārvades koeficients (K), izejas jauda (P_{iz}), lietderības koeficients (η) un ieejas kompleksā pretestība (Z_{ie}): [46]

$$K = \frac{\dot{U}_{iz}}{\dot{U}_{ie}} = \frac{\dot{I}_2 R_{sl}}{\dot{U}_{ie}} = \frac{j\omega M R_{sl}}{(j\omega L_2 + r_2 + R_{sl}) Z_{ie}}; \quad (2.5)$$

25 Tradicionālajiem transformatoriem ar magnētisko serdi saites koeficients ir ļoti tuvs 1.

26 Enerģijas zudumi spolēs ir saistīti galvenokārt ar tuvuma efektu spoles tinumos.

27 Sinusoidāla sprieguma avotu var izveidot, piemēram, kā jaudas pastiprinātājam pieslēgtu mazjaudas signāļģeneratoru.

$$P_{iz} = \frac{1}{2} |\dot{I}_2|^2 R_{sl} = \frac{1}{2} R_{sl} \left| \frac{j\omega M \dot{U}_{ie}}{(j\omega L_2 + r_2 + R_{sl}) Z_{ie}} \right|^2; \quad (2.6.)$$

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ie}} = \frac{P_{iz}}{\operatorname{Re}\{\dot{U}_{ie} \cdot I_1^*\}}; \quad (2.7.)$$

$$Z_{ie} = r_1 + j\omega L_1 + \frac{M^2 \omega^2}{R_{sl} + r_2 + j\omega L_2}, \quad (2.8.)$$

kur I_1^* – kompleksi sajūgta ieejas strāva.

Izteiksmi (2.8.) var pierakstīt arī šādi:

$$Z_{ie} = r_1 + j\omega L_1 + Z_{red}, \quad (2.9.)$$

kur Z_{red} – no uztverošās uz raidošo pusi reducētā kompleksā pretestība: [46]

$$Z_{red} = \frac{(M\omega)^2}{R_{sl} + r_2 + j\omega L_2}. \quad (2.10.)$$

No izteiksmes (2.9.) seko, ka 2.5. att. a ekvivalentās shēmas uztverošo daļu var reducēt uz raidošo daļu, kā tas ir parādīts 2.5. att. b. Lai analizētu BEP induktīvās sistēmas, bieži vien ir ērti izmantot uz raidošo pusi reducētu ekvivalento shēmu.

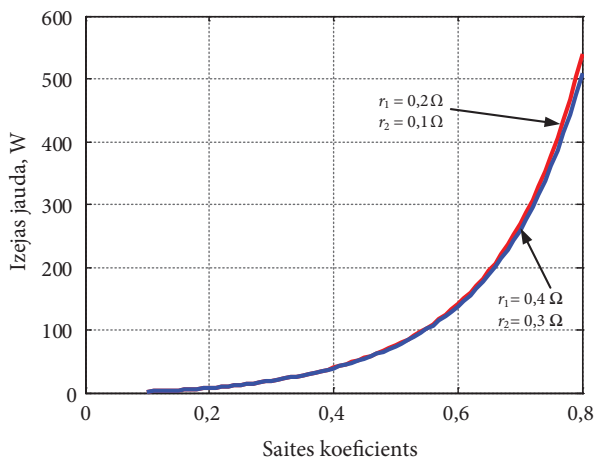
Ieejas kompleksā pretestība

Z_{ie} modulis pieaug, pieaugot saites koeficientam²⁸ (redzams no izteiksmes (2.8.)), un primārās strāvas efektīvā vērtība samazinās. Tātad var novērot interesantu parādību: jo uztverošā spole vairāk attālinās no raidošās spoles, jo lielāka kļūst primārās strāvas efektīvā vērtība un amplitūda. Tas notiek tāpēc, ka, samazinoties saites koeficientam (un mijinduktivitātei), samazinās $|Z_{red}|$. Ņemot vērā, ka ieejas kompleksai pretestībai ir izteikta imaginārā daļa, primārās spoles strāva nesakrīt fāzē ar ieejas spriegumu, savukārt primārajā ķēdē cirkulē pietiekami lielas reaktīvās strāvas un jaudas koeficients ir pietiekami zems. Pietiekami lielo reaktīvo strāvu dēļ būtiski pieaug zudumi.

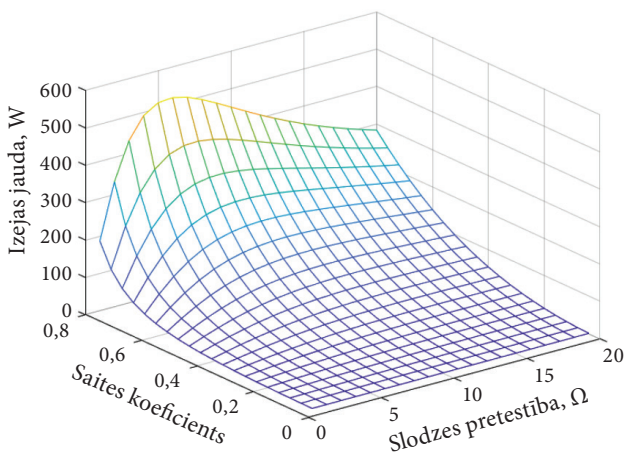
Izejas jauda

No (2.6.) var secināt, ka izejas jauda ir funkcija no vairākiem mainīgajiem: M (arī no k), U_{ie} , R_{sl} , L_1 , L_2 , r_1 , r_2 un frekvences. P_{iz} būtiski krītās, samazinoties saites koeficientam (2.6. un 2.7. att.) pie dažādām slodzes pretestībām. Kad saites koeficients mazāks par 0,1, līdz slodzei var pārvadīt daudzkārt mazāku jaudu nekā pie lielāka saites koeficienta pie tāda paša ieejas sprieguma un frekvences.

28 Jāatceras, ka saites koeficients ir tieši proporcionāls mijinduktivitātei.



2.6. att. Izejas jauda atkarībā no saites koeficienta (0,1–0,8) pie dažādām parazitiskajām pretestībām r_1 un r_2 ($L_1=L_2=25 \mu\text{H}$; $R_{sl}=5 \Omega$; $f=100 \text{ kHz}$; $U_{iem}=141 \text{ V}$).



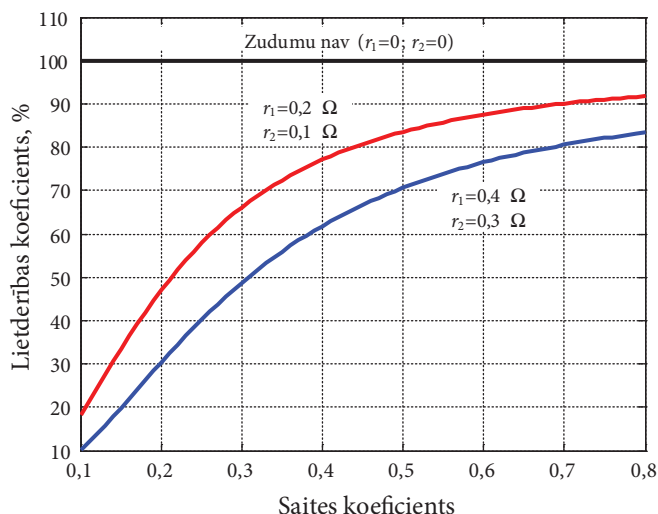
2.7. att. Izejas jauda atkarībā no saites koeficienta un slodzes pretestības ($L_1=L_2=25 \mu\text{H}$; $f=100 \text{ kHz}$; $U_{iem}=141 \text{ V}$; $r_1=0,4 \Omega$; $r_2=0,3 \Omega$).

Sakarība starp izejas jaudu un slodzes pretestību (pie dažāda k) ir sarežģītāka: pieaugot slodzes pretestībai, P_{iz} pieaug, sasniedz maksimumu un pēc tam samazinās (sk. 2.7. att.). Izejas jauda ir maksimāla tikai pie vienas slodzes pretestības vērtības. Zudumi mēreni ietekmē pārvadāmo jaudu (2.6. att.).

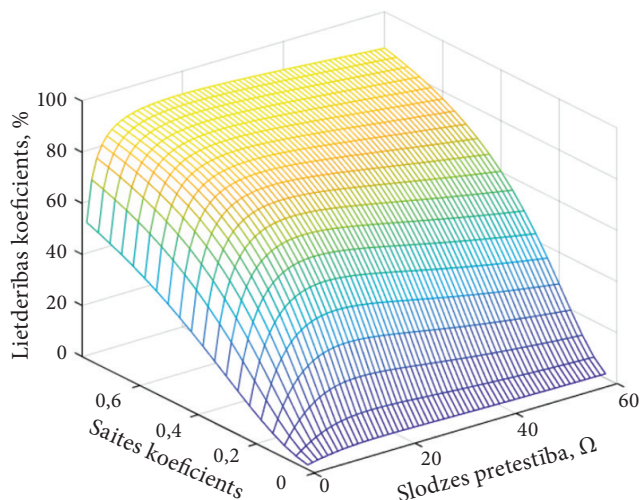
Lietderības koeficients

Līdzīgi kā izejas jauda, lietderības koeficients arī ir funkcija no vairākiem mainīgajiem: M (arī no k), R_{sl} , L_1 , L_2 , r_1 , r_2 un frekvences. Pieaugot enerģijas zudumiem spolēs (un citos elementos) vai samazinoties saites koeficientam (pie

dažādas slodzes pretestības), lietderības koeficients samazinās. Pie dažādām saites koeficienta vērtībām lietderības koeficients nav ļoti liels, jo induktīvās pretestības dēļ rodas lielas reaktīvās strāvas, kuru dēļ palielinās zudumi spolēs un savienojšajos vadītājos. Kad spoles ir vāji saistītas (k ir pietiekami zems), lietderības koeficients ir zems (2.8. un 2.9. att.). Svarīgi saprast, ka ideālā gadījumā (pie nulles enerģijas zudumiem) lietderības koeficients ir maksimāls (100 %) un nav atkarīgs no saites koeficienta (pat pie mazām saites koeficienta vērtībām). Līdzīgi kā izejas jauda, arī lietderības koeficients ir atkarīgs no slodzes pretestības (sk. 2.9. att.). Slodzes pretestības vērtība, pie kuras lietderības koeficients sasniedz maksimumu, ir nedaudz atkarīga no saites koeficienta. Pie zemākām frekvencēm var iegūt lielāku izejas jaudu.



2.8. att. Lietderības koeficients atkarībā no saites koeficienta (0,1–0,8) pie dažādas zudumu pretestības ($L_1=L_2=25 \mu\text{H}$; $R_{sl}=5 \Omega$; $f=100 \text{ kHz}$).



2.9. att. Lietderības koeficients atkarībā no saites koeficienta un slodzes pretestības ($L_1 = L_2 = 25 \mu\text{H}$; $f = 100 \text{ kHz}$; $U_{\text{iem}} = 141 \text{ V}$; $r_1 = 0,4 \Omega$; $r_2 = 0,3 \Omega$).

BEP induktīvās metodes trūkumi

- Lai izejā sasniegtu pietiekami lielu jaudu, primārajai spolei jāpievada pietiekami liels spriegums, tas palielina tranzistoru izmaksas (jo lielāks ir tranzistora maksimāli pieļaujama spriegums, jo dārgāks tas ir).
- Pietiekami lielu reaktīvo strāvu dēļ zudumi spolēs, tranzistoros un savienojšajos vadītājos var būt visai lieli, tā rezultātā lietderības koeficients būtiski samazinās.

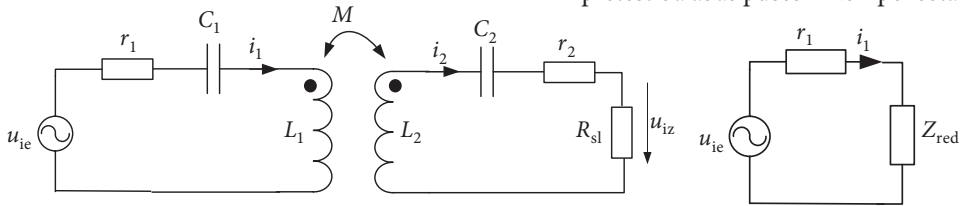
2.2. Rezonanses induktīvā pārvades metode

2.2.1. Rezonanses induktīvā pārvade ar divām spolēm

Lai būtiski samazinātu reaktīvās strāvas un palielinātu lietderības koeficientu, jākompensē induktīvā pretestība primārajā un sekundārajā daļā. To panāk, izmantojot kondensatoru un spoles virknes slēgumu, kā tas ir attēlots 2.10. attēlā. Šos rezonanses kontūru kondensatorus sauc par kompensācijas kondensatoriem.

Labākai BEP rezonanses induktīvās metodes sapratnei apskatīsim BEP rezonanses induktīvās sistēmas ekvivalento shēmu (2.10. att.). Rezistors ar aktīvo pretestību r_1 ietver zudumus raidošajā spolē L_1 un kondensatorā C_1 , kā arī barošanas avota iekšējo pretestību. Savukārt rezistors ar aktīvo pretestību r_2 ietver zudumus uztverošajā spolē L_2 un kondensatorā C_2 , kā arī savienojšajos vadītājos. Lai vienkāršotu analīzi, pieņemsim, ka barošanas avota spriegums ir sinusoidāls.

a) ekvivalentā shēma ar virknes-virknes kompensāciju



b) uz primāro pusi reducēta ekvivalentā shēma, ja induktīvā pretestība abās pusēs ir kompensēta

2.10. att. BEP rezonances induktīvās sistēmas. Piezīme: aizgūts modificētā formā no [47] ar atļauju no autortiesību turētāja.

Lai padziļinātu sapratni par rezonances induktīvām sistēmām, aplūkosim dažas svarīgākās izteiksmes. No ekvivalentās shēmas var sastādīt vienādojumu sistēmu:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ie} = \dot{I}_1 \left(r_1 + j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} \right) - j\omega M \dot{I}_2 \\ j\omega M \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(r_2 + j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2} + R_{sl} \right) \end{cases} \quad (2.11.)$$

No (2.11.) seko, ka ieejas kompleksā pretestība ir: [47]

$$Z_{ie} = r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{\omega^2 M^2}{R_{sl} + r_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}. \quad (2.12.)$$

Sekundārās strāvas kompleksā amplitūda: [47]

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M \dot{U}_{ie}}{\left[\left(j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2} \right) + (r_2 + R_{sl}) \right] Z_{ie}}. \quad (2.13.)$$

Kompleksais sprieguma pārvades koeficients:

$$K = \frac{\dot{U}_{iz}}{\dot{U}_{ie}} = \frac{\dot{I}_2 R_{sl}}{\dot{U}_{ie}} = \frac{j\omega M R_{sl}}{\left[\left(j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2} \right) + (r_2 + R_{sl}) \right] Z_{ie}}. \quad (2.14.)$$

Iejas jaudu var aprēķināt pēc formulas:

$$P_{iz} = \frac{1}{2} |\dot{I}_2|^2 R_{sl}. \quad (2.15.)$$

Savukārt lietderības koeficientu apraksta šāda izteiksme:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ie}} = \frac{P_{iz}}{\operatorname{Re} \{ \dot{U}_{ie} \cdot \dot{I}_1^* \}}. \quad (2.16.)$$

Izteiksme (2.12.) skaidri parāda: ja raidošās spoles reaktīvā pretestība un raidošā rezonanses kontūra kondensatora reaktīvā pretestība nav vienādas un ja uztverošās spoles reaktīvā pretestība un uztverošā rezonanses kontūra kondensatora reaktīvā pretestības nav vienādas, tad BEP sistēmas ieejas kompleksā pretestība nav tīri aktīva un ieejas strāva nesakrīt fāzē ar ieejas spriegumu²⁹ (ja ieejā ir taisnstūrveida spriegums, tad pie atšķirīgām iepriekš minētajām reaktīvajām pretestībām ieejas strāvas pamatharmonika nesakrītis fāzē ar ieejas sprieguma pamatharmoniku). Tas nozīmē, ka ieejas jaudas faktors būs mazāks par vienu un enerģijas zudumi reaktīvo strāvu dēļ pieaugs.

Interesanti un noderīgi apskatīt ieejas kompleksās pretestības moduļa un fāzes atkarību no frekvences pie dažādiem saites koeficientiem (2.11. att.). Attēlā skaidri redzams, ka pie vājas induktīvās saites³⁰ starp spolēm fāzes frekvences raksturlikne šķērso nulli tikai vienu reizi – pie primārā un sekundārā rezonanses kontūra rezonanses frekvences (f_{rez})³¹. Frekvenci f_{rez} sauc par BEP sistēmas pamatrezonanses frekvenci. Pie šīs frekvences ieejas kompleksā pretestība ir tīri aktīva un precīzi vai aptuveni pie f_{rez} tā sasniedz minimumu. Ja saites koeficienta vērtība pārsniedz kritisko vērtību (k_{bif})³² fāzes frekvences raksturlikne šķērso nulli trīs reizes – pie frekvences f_{zbf} , f_{vbf} un f_{abf} . Parādību, kad elektriskās ķēdes ieejas kompleksās pretestības fāzes frekvences raksturlikne šķērso nulli vairāk nekā vienu reizi, ķēžu teorijā sauc par *frekvences bifurkāciju*. Frekvenci f_{zbf} sauc par zemāko bifurkācijas frekvenci, f_{vbf} ir vidēja bifurkācijas frekvence un f_{abf} ir augstākā bifurkācijas frekvence. [29] Aptuveni pie šīm frekvencēm ieejas kompleksās pretestības modulim ir lokālie ekstrēmumi (sk. 2.11. att.): pie f_{zbf} un f_{abf} ieejas kompleksās pretestības modulis sasniedz minimumu, bet pie f_{vbf} tas sasniedz maksimumu. f_{vbf} ir vienāda ar f_{rez} .

Saites koeficienta kritiskā vērtība (k_{bif}), virs kuras parādās frekvences bifurkācija, ir vienāda ar: [29]

$$k_{bif} = \frac{1}{Q_1} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_1^2}}, \quad (2.17)$$

$Q_1 = \omega_0 L_1 / (R_{s1} + r_2)$, ja $L_1 = L_2$. [29]

Analizēsim detalizētāk sprieguma pārvades koeficientu, izejas jaudu un lietderības koeficientu atkarībā no dažādiem parametriem. Interesanta sakarība ir novērojama starp sprieguma pārvades koeficienta moduli un izejas jaudu (2.12. un 2.13. att. a). Šajos attēlos pie pietiekami liela saites koeficienta un nelielas R_{s1} ir novērojams frekvences sadalīšanas efekts³³: maksimāls sprieguma pārvades

29 Kad saites koeficients pārsniedz kritisko vērtību, tad, kā tas būs parādīts turpmāk, tīri aktīva ieejas kompleksā pretestība var būt sasniegta arī tad, kad raidošās spoles un raidošā rezonanses kontūra kondensatora reaktīvā pretestība nav vienādas un kad uztverošās spoles un uztverošā rezonanses kontūra kondensatora reaktīvā pretestība nav vienādas pie divām atsevišķām frekvencēm.

30 Precīzāk sakot, kad saites koeficients ir zemāks par noteikto kritisko vērtību k_{bif} . [29]

31 Parasti primārā un sekundārā kontūra rezonanses frekvence (f_{rez1} un f_{rez2}) sakrīt.

32 Var bieži novērot pietiekami stipras induktīvās saites gadījumā.

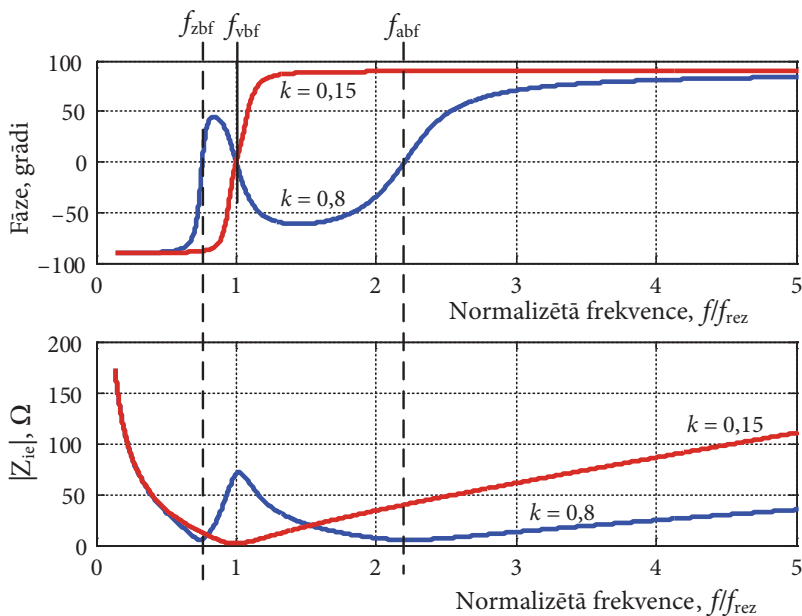
33 Angļu val. – *frequency splitting*

koeficients un izejas jauda ir novērojami pie divām frekvencēm – nepāra sadalīšanas frekvences (f_{nsf}) un pāra sadalīšanas frekvences f_{psf} . Pie maziem saites koeficientiem ir tikai viens maksimums – aptuveni pie pamatrezonanses frekvences f_{rez} . Jaudas maksimumu frekvence galvenokārt ir funkcija no saites koeficienta. Kā pierādīts rakstā [29], ja raidošā kontūra rezonanses frekvence f_{rez1} ir vienāda ar uztverošā kontūra rezonanses frekvenci f_{rez2} , $L_1=L_2$ un $2\pi L_1 f_{\text{rez}}/R_{\text{sl}} \gg 1$, tad sadalīšanas frekvences var aptuveni aprēķināt, izmantojot šādas izteiksmes:

$$f_{\text{nsf}} \approx \frac{f_{\text{rez}}}{\sqrt{1+k}}, \quad (2.18.)$$

$$f_{\text{psf}} \approx \frac{f_{\text{rez}}}{\sqrt{1-k}}. \quad (2.19.)$$

Vispārīgā gadījumā f_{nsf} tikai aptuveni vienāda ar f_{zbf} bet f_{psf} tikai aptuveni vienāda ar f_{abf} . [29] Detalizētāk par frekvences bifurkāciju un sadalīšanu rezonanses induktīvās BEP sistēmās lasiet rakstā [29].



2.11. att. Ieejas kompleksās pretestības fāze un modulis atkarībā no normalizētās frekvences pie diviem dažādiem saites koeficientiem. Parametri: $f_{\text{rez}} = 150$ kHz; $L_1=L_2=25$ μ H; $C_1=C_2=45,077$ nF; $R_{\text{sl}}=5$ Ω ; $U_{\text{iem}}=141$ V; $r_1=0,2$ Ω un $r_2=0,1$ Ω .

Rakstā [29] arī ir pierādīts, ka saites koeficienta kritiskā vērtība (k_{sad}), virs kuras parādās frekvences sadalīšanas efekts, ir aptuveni vienāda ar:

$$k_{\text{sad}} \approx \frac{1}{Q_2} \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_2^2}}, \quad (2.20.)$$

kur $Q_2 = \omega_0 L_2 / R_{\text{sl}}$ (ja $L_1=L_2$). [29]

No (2.20.) un 2.13. att. seko, ka k_{sad} vērtība pieaug, pieaugot R_{sl} (frekvences sadalīšanas efekts ir vairāk izteikts pie mazākām R_{sl}).

Rodas loģisks jautājums: pie kuras no iepriekš minētajām frekvencēm jāstrādā BEP sistēmai? Citiem vārdiem sakot, kādai jābūt raidošās daļas invertora komutācijas frekvencei f_{sw} . Bieži par BEP sistēmas invertora komutācijas frekvenci izvēlas tās pamatrezonanses frekvenci f_{rez} (pie nosacījuma, ka $f_{\text{rez}} = f_{\text{rez1}} = f_{\text{rez2}}$). Kāpēc šī izvēle ir izdevīga? Aplūkojot izteiksmi (2.12.), kļūst skaidrs, ka pie jebkura saites koeficienta (vai mijinduktivitātes) vienmēr ir tīri aktīva ieejas kompleksā pretestība (sk. arī (2.23.)), ieejas strāva sakrīt fāzē ar ieejas spriegumu un ieejas jaudas koeficients ir maksimāls (viens). Pie tam BEP sistēma ir pilnībā kompensēta pie jebkura attāluma starp spolēm. Pie šīs frekvences lietderības koeficients arī būs precīzi vai aptuveni maksimāls (sk. 2.13. att. a) (ja slodzes pretestība ir pietiekami neliela un tranzistoru un diožu dinamiskie zudumi ir vismaz dažas reizes mazāki nekā kopējie vadītspējas zudumi). Svarīgi atzīmēt, ka pie pietiekami lielās slodzes pretestības, maksimāls lietderības koeficients būs pie frekvences, kas var pietiekami stipri atšķirties no f_{rez} . Pie tam, pieaugot R_{sl} , pieaug frekvence, pie kuras lietderības koeficients sasniedz maksimumu (sk. 2.14. att.), bet jauda pie šīs frekvences būs daudzkārt mazāka nekā pie f_{rez} (2.13. att. b).

BEP sistēmai ar virknes-virknes kompensāciju kompensācijas kondensatoru kapacitāti var aprēķināt pēc formulām:

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{rez}}^2 L_1}, \quad (2.21.)$$

$$C_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{rez}}^2 L_2}. \quad (2.22.)$$

Ļoti svarīgi atzīmēt, ka kontūros var cirkulēt pietiekami liela strāva un atrast kondensatoru, kas to spēj izturēt, bieži vien nav iespējams, tāpēc kompensācijas kondensatoru bieži veido vairāku kondensatoru paralēls slēgums, pateicoties tam, var būtiski samazināt uz katra kondensatora izkliedēto jaudu. Lai paralēlajā slēgumā izmantotu mazāku skaitu kondensatoru un iegūtu augstāku lietderības koeficientu, kondensatori jāizvēlas ar iespējami mazākiem zudumiem (ar iespējami mazāko ekvivalento virknes aktīvo pretestību).

Rezonanses induktīvās BEP sistēmas ar virknes-virknes kompensāciju darbība pie f_{rez}

Pie f_{rez} ieejas kompleksās pretestības un uz primāro pusi reducētas pretestības izejas jaudas un lietderības koeficienta izteiksme būtiski vienkāršojas: [47]

$$Z_{\text{ie}} = r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{\text{sl}} + r_2}, \quad (2.23.)$$

$$Z_{\text{red}} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{\text{sl}} + r_2}, \quad (2.24.)$$

$$P_{iz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega M U_{iem}}{r_1 r_2 + r_1 R_{sl} + \omega^2 M^2} \right)^2 R_{sl}, \quad (2.25.)$$

$$\eta = \frac{\omega^2 M^2 R_{sl}}{(r_2 + R_{sl})(\omega^2 M^2 + r_1 r_2 + r_1 R_{sl})}. \quad (2.26.)$$

Lietderības koeficienta izteiksmē (2.26.), izmantojot uz primāro pusi reducētas pretestības Z_{red} izteiksmi (2.24.), var iegūt vienkāršāku lietderības koeficienta izteiksmi (kad primārā un sekundārā puse ir noskaņotas rezonansē):

$$\eta = \frac{Z_{red}}{Z_{red} + r_1} \cdot \frac{R_{sl}}{r_2 + R_{sl}}. \quad (2.27.)$$

Atšķirībā no induktīvām sistēmām, kurās, pieaugot saites koeficientam, izejas jauda pieaug, rezonanses induktīvās sistēmās, saites koeficientam pieaugot, izejas jauda pieaug līdz noteiktai maksimālai vērtībai un pēc tam samazinās, to uzskatāmi parāda 2.15. attēls. Izejas jauda sasniedz maksimumu tikai pie vienas slodzes pretestības (pie dotās k vērtības).

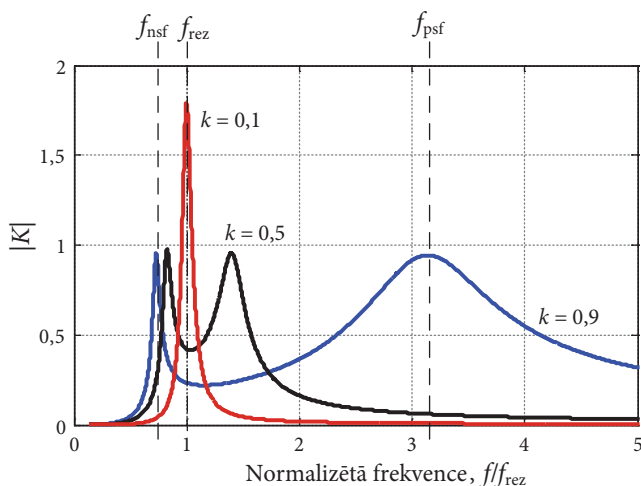
Līdzīgi kā induktīvās BEP sistēmās, rezonanses induktīvās sistēmās lietderības koeficients pieaug, pieaugot saites koeficientam (pie dažādām R_{sl}). un sasniedz maksimumu tikai pie vienas slodzes pretestības (2.16. att.), kuru nosauksim par optimālo slodzes pretestību un apzīmēsim to ar R_{opt} . Tātad, lai iegūtu maksimālo lietderības koeficientu, slodzes ekvivalentai pretestībai jābūt vienādai ar R_{opt} , neraugoties uz slodzes pretestības izmaiņām, kas var notikt, piemēram, baterijai lādējoties. R_{opt} var noteikt meklējot (2.26.) maksimumu, risinot vienādojumu:

$$\frac{d\eta}{dR_{sl}} = 0. \quad (2.28.)$$

Atrisinot vienādojumu (2.28.), var iegūt optimālās slodzes pretestības izteiksmi:

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{r_2 (\omega M)^2}{r_1} + r_2^2} \approx \omega M \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}. \quad (2.29.)$$

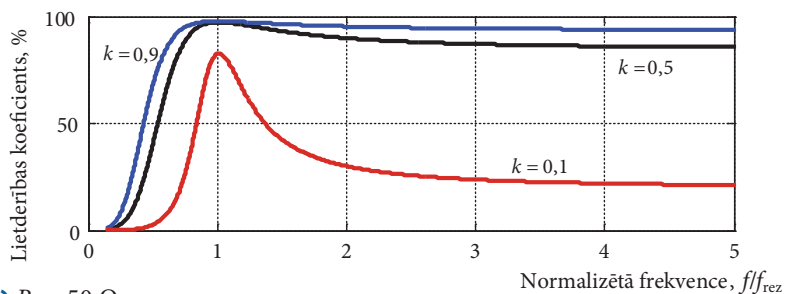
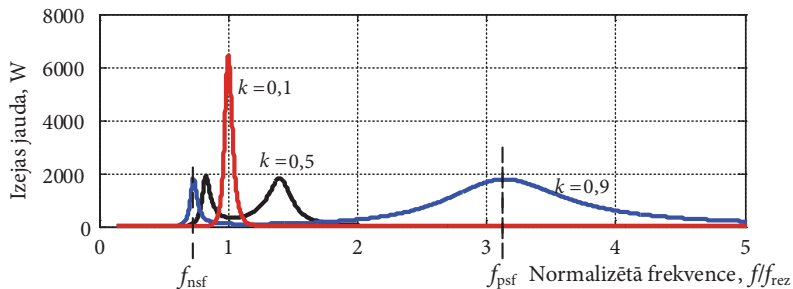
Tātad rezonanses induktīvās BEP sistēmas ar virknes-virknes kompensāciju optimālā slodzes pretestība, pie kuras lietderības koeficients sasniedz maksimumu, ir aptuveni proporcionāla frekvencei un mijinduktivitātei (un saites koeficientam).



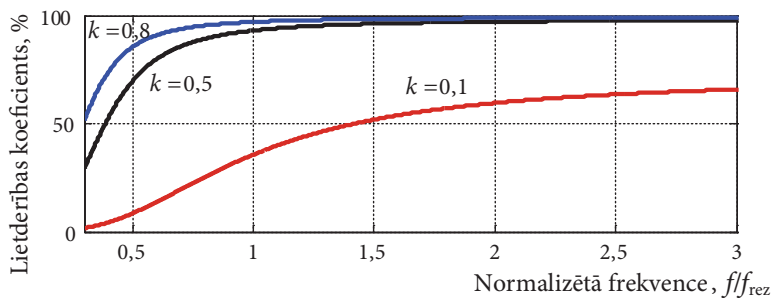
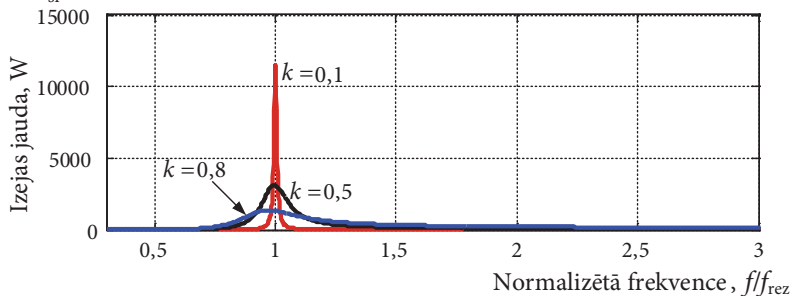
2.12. att. Sprieguma pārvades koeficienta modulis atkarībā no normalizētās frekvences. Parametri tādi paši kā 2.11. att.

Svarīgi atzīmēt, ka lietderības koeficienta izteiksmes (2.16.), (2.26.) un (2.27.) neievēro pusvadītāju komponentu dinamiskos zudumus un zudumus vadības ķēdēs, tāpēc šīs izteiksmes ļauj tikai aptuveni aprēķināt BEP sistēmas lietderības koeficientu. Jo mazāki ir BEP sistēmas dinamiskie zudumi un zudumi vadības ķēdēs attiecībā pret vadītspējas zudumiem (angļu val. – *conduction loss*), jo precīzāk var aprēķināt lietderības koeficientu, izmantojot šīs izteiksmes.

a) $R_{s1} = 5 \Omega$

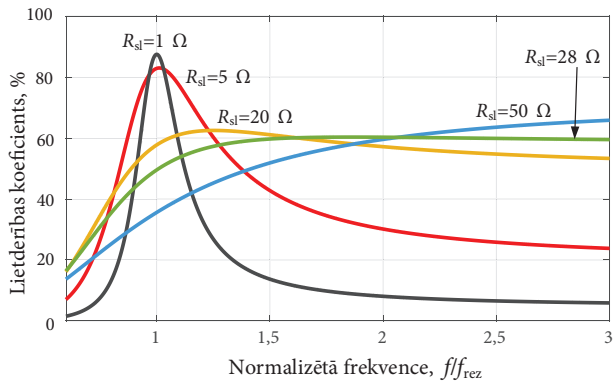


b) $R_{s1} = 50 \Omega$



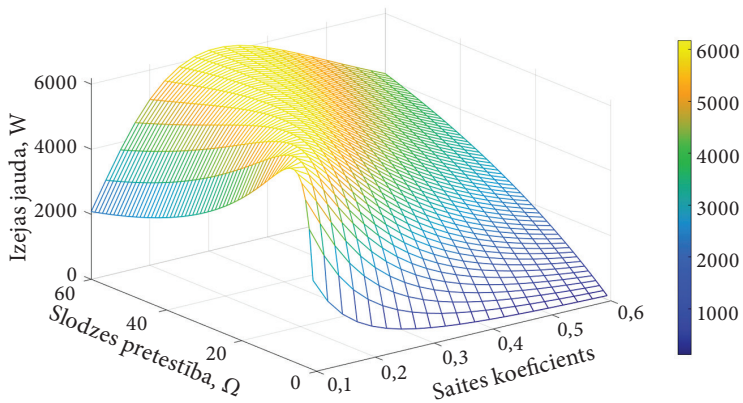
2.13. att. Izejas jauda un lietderības koeficients atkarībā no normalizētās frekvences:

a – $R_{s1} = 5 \Omega$; b – $R_{s1} = 50 \Omega$. Parametri: $f_{rez} = 150 \text{ kHz}$; $L_1 = L_2 = 25 \mu\text{H}$; $C_1 = C_2 = 45,077 \text{ nF}$; $U_{iem} = 141 \text{ V}$; $r_1 = 0,2 \Omega$ un $r_2 = 0,1 \Omega$.

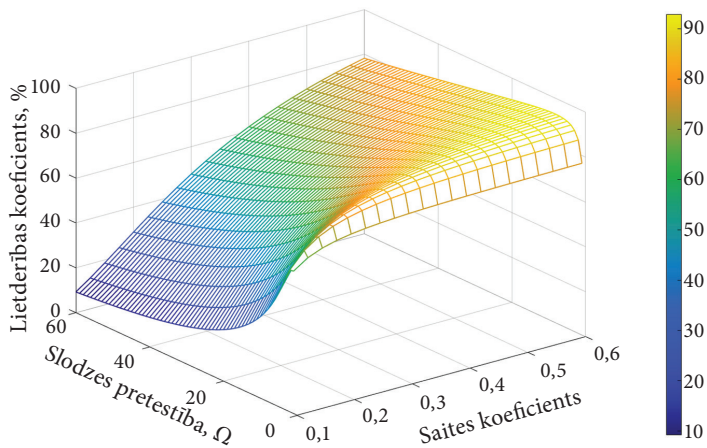


2.14. att. Lietderības koeficients atkarībā no normalizētās frekvences.

Parametri: $f_{rez} = 150 \text{ kHz}$; $L_1 = L_2 = 25 \text{ } \mu\text{H}$; $C_1 = C_2 = 45,077 \text{ nF}$; $k = 0,1$; $U_{iem} = 141 \text{ V}$; $r_1 = 0,2 \text{ } \Omega$ un $r_2 = 0,1 \text{ } \Omega$.



2.15. att. Izejas jauda atkarībā no saites koeficienta un slodzes pretestības. Parametri: $L_1 = L_2 = 25 \text{ } \mu\text{H}$; $C_1 = C_2 = 101,42 \text{ nF}$; $f = f_{rez} = 100 \text{ kHz}$; $U_{iem} = 141 \text{ V}$; $r_1 = 0,4 \text{ } \Omega$; $r_2 = 0,3 \text{ } \Omega$.



2.16. att. Lietderības koeficients atkarībā no saites koeficienta un slodzes pretestības. Parametri: $L_1 = L_2 = 25 \mu\text{H}$; $C_1 = C_2 = 101,42 \text{ nF}$; $f = f_{\text{rez}} = 100 \text{ kHz}$; $U_{\text{iem}} = 141 \text{ V}$; $r_1 = 0,4 \Omega$; $r_2 = 0,3 \Omega$.

Secinājumi:

- līdzīgi kā izejas jauda, lietderības koeficients ir funkcija no vairākiem mainīgajiem: saites koeficienta, frekvences, elektrisko komponentu enerģijas zudumiem, slodzes pretestības;
- pieaugot saites koeficientam, pieaug lietderības koeficients, bet izejas jauda sasniedz maksimumu tikai pie vienas k vērtības (dotās R_{sl});
- lietderības koeficients vai izejas jauda sasniedz maksimumu tikai pie vienas R_{sl} vērtības (dotā k);
- R_{sl} optimālā vērtība, pie kuras var sasniegt maksimālo lietderības koeficientu, vispārīgā gadījumā atšķiras no R_{sl} optimālās vērtības, pie kuras var sasniegt maksimālo izejas jaudu;
- vispārīgā gadījumā frekvence, pie kuras lietderības koeficients ir maksimāls, nav vienāda ar frekvenci, pie kuras izejas jauda ir maksimāla;
- ja saites koeficienta vērtība ir mazāka par saites koeficienta kritisko vērtību, virs kuras parādās frekvences sadalīšanas efekts, tad izejas jaudas maksimums ir pie f_{rez} vai aptuveni pie tās;
- ja saites koeficienta vērtība pārsniedz saites koeficienta kritisko vērtību, virs kuras parādās frekvences sadalīšanas efekts, tad izejas jaudas maksimums ir pie divām dažādām frekvencēm (viena ir lielāka, bet otra ir mazāka nekā f_{rez});
- frekvences sadalīšanas efekts ir vairāk raksturīgs zemākām R_{sl} : jo lielāka ir slodzes pretestība, jo lielāka ir saites koeficienta kritiskā vērtība, virs kuras parādās frekvences sadalīšanas efekts;

- pie pietiekami zemas slodzes pretestības maksimāls lietderības koeficients ir sasniedzams pie frekvences, kas ir vienāda vai ļoti tuva BEP sistēmas pamatrezonanses frekvencei³⁴ f_{rez} ;
- pie pietiekami lielas slodzes pretestības frekvence, pie kuras lietderības koeficients ir maksimāls, var ievērojami atšķirties no f_{rez} ; pie tam, pieaugot R_{sl} , pieaug frekvence, pie kuras lietderības koeficients sasniedz maksimumu; taču tas nenozīmē, ka pie lielākām R_{sl} BEP sistēmas darba frekvence jāizvēlas vienāda ar frekvenci, pie kuras lietderības koeficients ir maksimāls, jo izejas jauda var ievērojami samazināties, BEP sistēmas frekvencei attālinoties no f_{rez} , it īpaši pie zemiem k (sk. 2.13. att. b);
- maksimāls lietderības koeficients rezonanses induktīvai BEP sistēmai ir ievērojami lielāks nekā induktīvai BEP sistēmai;
- lietderības koeficienta izteiksmi var viegli izteikt ar uz primāro pusi reducēto pretestību; pie tam, jo lielāka ir uz primāro pusi reducētā pretestība, jo lielāks ir lietderības koeficients (sk. (2.27));
- jo zemāks saites koeficients, jo straujāk kritas lietderības koeficients, pieaugot slodzes pretestībai (no tās optimālās vērtības).

Slodzes neatkarīgas izejas strāvas vai slodzes neatkarīga izejas sprieguma režīms

Ņemot vērā, ka, lādējot akumulatoru baterijas, ļoti svāriģi nodrošināt konstantas izejas strāvas vai konstanta izejas sprieguma režīmu, izejas strāvu (I_2) apskatīsim kā slodzes pretestības funkciju. No (2.12.) un (2.13.) var iegūt, ka pie f_{rez} :

$$I_{2m} = \frac{\omega M U_{iem}}{r_1(r_2 + R_{sl}) + \omega^2 M^2} = \frac{\omega k \sqrt{L_1 L_2} U_{iem}}{r_1(r_2 + R_{sl}) + \omega^2 k^2 L_1 L_2}, \quad (2.30.)$$

kur I_{2m} – izejas strāvas amplitūda.

No (2.30.) var izdarīt svarīgu secinājumu: pie f_{rez} , BEP sistēma ar virknes-virknes kompensāciju var darboties slodzes-neatkarīgas izejas strāvas režīmā (protams, ja $r_1(r_2 + R_{sl}) \ll \omega^2 M^2$)³⁵. Reizinot (2.30.) ar R_{sl} , var iegūt sakarību starp izejas sprieguma amplitūdu un slodzes pretestību. Loģiski, ka BEP sistēmai ar virknes-virknes kompensāciju pie f_{rez} nevar sasniegt slodzes-neatkarīga izejas sprieguma režīmu, taču šo režīmu aptuveni var iegūt pie citas frekvences: [30]

$$f_{kspr} = \frac{f_{rez}}{\sqrt{1 \pm k}}. \quad (2.31.)$$

34 Šis secinājums ir pareizs, ja vadītspējas zudumi ir dominējoši. Ja dinamiskie zudumi ir samērojami ar vadītspējas zudumiem vai dominējoši, tad vēlams invertora komutācijas frekvenci izvēlēties nedaudz augstāku nekā pamatrezonanses frekvence, lai tranzistoriem un diodēm panāktu mīksto komutāciju (pārslēgšanu pie nulles sprieguma).

35 Šī formula parāda, ka reālajā dzīvē nenulles parazitisko pretestību (r_1 un r_2) dēļ slodzes neatkarīgs izejas strāvas režīms sasniedzams tikai aptuveni.

Interesenti var lasīt rakstu [30], kurā ir iegūtas izteiksmes BEP sistēmu darba frekvencēm ar dažādām kompensācijas topoloģijām, pie kurām var sasniegt slodzes-neatkarīgas konstantas izejas strāvas vai slodzes-neatkarīga konstanta izejas sprieguma režīmu.

Kompensācijas veidi

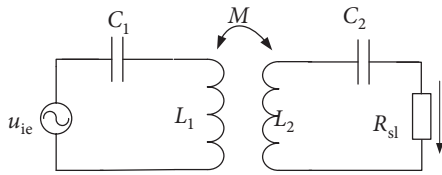
No elektrotehnikas pamatiem labi zināms, ka ar reaktīvās jaudas kompensāciju elektriskajās ķēdēs ar izteiktu induktīvo komponenti saprot reaktīvās jaudas minimizēšanu ar nolūku iegūt fāzē sakrītošu ieejas spriegumu un strāvu, maksimālo jaudas faktoru un maksimālo slodzes aktīvo jaudu. To var panākt, ieslēdzot kondensatoru, piemēram, virknē ar induktīvo ķēdi, ar tādu kapacitāti, lai pie darba frekvences tā kapacitatīvā pretestība būtu vienāda ar ķēdes induktīvo pretestību. Kompensācijas ķēde primārajā un sekundārajā pusē vajadzīga ne tikai, lai samazinātu reaktīvās strāvas un uzlabotu lietderības koeficientu, bet arī, lai BEP sistēma darbotos slodzes neatkarīgā izejas strāvas vai izejas sprieguma režīmā (atkarībā no darba frekvences un kompensācijas topoloģijas). Līdz šim brīdim tika detalizēti apskatīta vispopulārākā virknes-virknes kompensācijas topoloģija. Taču pastāv arī citas kompensācijas topoloģijas. Katrai no tām piemīt gan priekšrocības, gan trūkumi. Klasisko kompensācijas topoloģiju shēmas ir parādītas 2.17. attēlā.

Klasiskie kompensācijas veidi ir: virknes-virknes kompensācija, virknes-paralēlā kompensācija, paralēlā-virknes kompensācija un paralēlā-paralēlā kompensācija (2.17. att.). Klasiskās kompensācijas topoloģijas ar virknes kompensāciju primārajā pusē vairāk paredzētas BEP sistēmām ar sprieguma avota invertoru, bet ar primāro paralēlo kompensāciju – ar strāvas avota invertoru. Kompensācijas topoloģijas ar primāro paralēlo kompensāciju lietojumu loks ir visai šaurs – tās lieto lieljaudas augstsprieguma lietojumos. [25] BEP sistēmai ar virknes-paralēlo kompensāciju pie pietiekami lielām R_{sl} vērtībām izejas sprieguma efektīvā vērtība ir gandrīz neatkarīga no slodzes pretestības³⁶, ja [30]

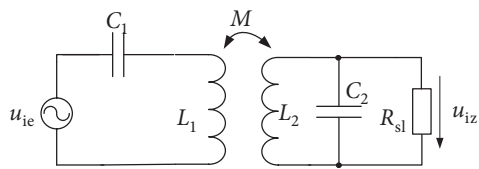
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1 (1 - k^2)}}.$$

36 Pieaugot parazitiskām pretestībām r_1 un r_2 , izejas spriegums kļūst vairāk atkarīgs no slodzes pretestības.

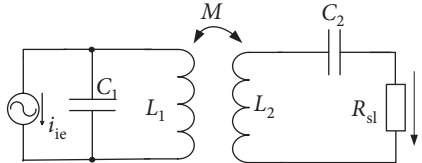
a) ar virknes-virknes kompensāciju



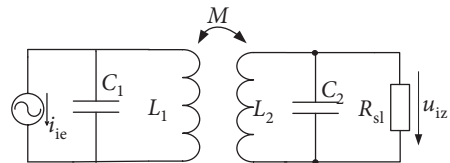
b) ar virknes-paralēlo kompensāciju



c) ar paralēlo-virknes kompensāciju



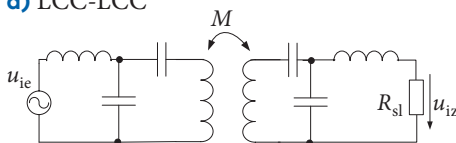
d) ar paralēlo-paralēlo kompensāciju



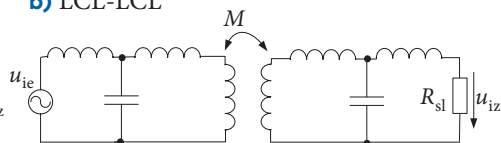
2.17. att. Rezonanses induktīvo BEP sistēmu ekvivalentās shēmas ar klasiskiem kompensācijas veidiem.

Pastāv arī sarežģītāki kompensācijas veidi, piemēram, LCC-LCC un LCL-LCL topoloģija (sk. 2.18. att.) kam piemīt augstāka lietderības koeficienta un izejas sprieguma vai izejas strāvas neatkarība no slodzes pretestības, mijinduktivitātes starp spolēm un dažiem citiem parametriem nekā klasiskajām kompensācijas topoloģijām, tas ir ļoti svarīgi bateriju lādēšanas procesā. [25], [30], [34]

a) LCC-LCC



b) LCL-LCL



2.18. att. Sarežģītākas kompensācijas topoloģijas.

2.2.2. Rezonanses induktīvā pārvade ar trim un četrām spolēm

Nereti rezonanses induktīvo BEP izmanto gadījumos, kad saites koeficients ir ļoti zems ($<0,1$). Piemēram, ja elektroenerģiju pievada implantētām biomedicīnas ierīcēm, kuru sekundārās spoles izmēri ir ļoti mazi (tas savukārt nozīmē mazu saites koeficientu un mijinduktivitāti) vai arī ja elektriskā enerģija jāpārveda lielākā (par raidošās spoles diametru) attālumā. Analizējot (2.26.) un 2.16. att., var secināt, ka pie ļoti zemas mijinduktivitātes lietderības koeficients strauji krītas, slodzes pretestībai attālinoties no optimālās vērtības, jo uz primāro pusi reducēta pretestība ir pietiekami zema pie mazas mijinduktivitātes un pie pietiekami lielas slodzes pretestības. Tātad maza saistes koeficienta gadījumā jācenšas palielināt uz primāro pusi reducēto pretestību. To var izdarīt, palielinot invertora komutācijas frekvenci. Tāpēc bieži BEP sistēmas ar rezonanses induktīvo metodi pie pārvades

attāluma, kas pārsniedz raidošās spoles diametru, darbojas MHz diapazonā. Taču šim paņēmienam ir ierobežojumi, jo, pieaugot frekvencei, pieaug arī enerģijas zudumi spolēs, invertorā u.c. Paralēli šim paņēmienam uz primāro pusi reducēto pretestību un arī lietderības koeficientu pie ļoti vāja saites koeficienta var palielināt, arī izmantojot papildu spoles ar kompensācijas kondensatoriem (vai pat izmantojot pašrezonanses spoli(es)). Apskatīsim trīs spoļu BEP sistēmas.

Trīs spoļu sistēmas vienkāršota shēma ir parādīta 2.19. attēlā. Pirmā sekundārā spole L_2 uztver magnētisko lauku no raidošās spoles L_1 un ir induktīvi saistīta ar otro sekundāro spoli L_3 . Var pierādīt, ka trīs spoļu sistēmas lietderības koeficients ir: [35]

$$\eta = \frac{R_{\text{red1}}}{r_1 + R_{\text{red1}}} \frac{R_{\text{red2}}}{r_2 + R_{\text{red2}}} \frac{R_{\text{sl}}}{r_3 + R_{\text{sl}}}, \quad (2.32.)$$

kur R_{red1} – uz primārās spoles kontūru reducēta pretestība; [35]

$$R_{\text{red1}} = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{r_2 + \frac{\omega^2 M_{23}^2}{r_3 + R_{\text{sl}}}}$$

R_{red2} – uz pirmās sekundārās spoles kontūru reducēta pretestība; [35]

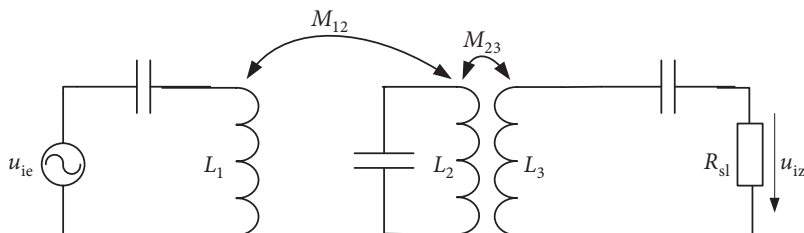
$$R_{\text{red2}} = \frac{\omega^2 M_{23}^2}{R_{\text{sl}} + r_3}$$

r_1 – aktīvā pretestība L_1 kontūrā;

r_2 – aktīvā pretestība L_2 kontūrā;

r_3 – aktīvā pretestība L_3 kontūrā.

Salīdzinot izteiksmi (2.32.) trīs spoļu BEP sistēmu lietderības koeficientam ar izteiksmi (2.27.) divu spoļu sistēmām, var secināt, ka pie tās pašas mijinduktivitātes (M_{12}) starp pirmo un otro spoli un pietiekami lielas slodzes pretestības, trīs spoļu sistēmām ir lielāks lietderības koeficients³⁷, jo R_{red1} (trīs spoļu sistēmām) ir ievērojami lielāks nekā R_{red} divu spoļu sistēmām (pie pietiekami lielas slodzes pretestības). Lietderības koeficients būs būtiski lielāks trīs spoļu sistēmām salīdzinājumā ar divu spoļu sistēmām pie ļoti mazas mijinduktivitātes starp pirmo un otro spoli un pietiekami lielas slodzes pretestības. Vairāk par trīs spoļu BEP sistēmām var lasīt [35].



2.19. att. Trīs spoļu BEP sistēmas vienkāršota shēma. Piezīme: aizgūts būtiski modificētā formā no [35].

37 Pat neņemot vērā to, ka R_{red2} kritas, pieaugot R_{sl} , jo R_{red1} ir noteicošāks nekā R_{red2} .

Kā jau minēts iepriekš (1.3. tabula un 1.3. att.), elektroenerģiju var pārvadīt, arī izmantojot 4 spoles. Šī metode arī ļauj iegūt lielāku lietderības koeficientu nekā klasiskā divu spoļu rezonanses induktīvā metode pie tādas pašas izejas jaudas, ja attālums starp raidošo un uztverošo spoli ir daudzkārt lielāks par to rādiusu. Pētnieki no Masačūsetas Tehnoloģiju Institūta to nosaukuši par *Strongly Coupled Magnetic Resonance*. Kā tas iespējams? Taču gadījumā, kad raidošā un uztverošā spole atrodas tālu viena no otras, induktīvai saitei jābūt vājai. To viegli izskaidrot, aplūkojot 2.20. attēlu. Četru spoļu ķēdi var aizvietot ar divu spoļu ekvivalento shēmu (2.20. att.). Starp šīs ekvivalentās shēmas spolēm ekvivalentais saites koeficients ir vienāds ar: [33]

$$K_{\text{ekv}} = \frac{K_{12}K_{34}}{K_{23}}, \quad (2.33.)$$

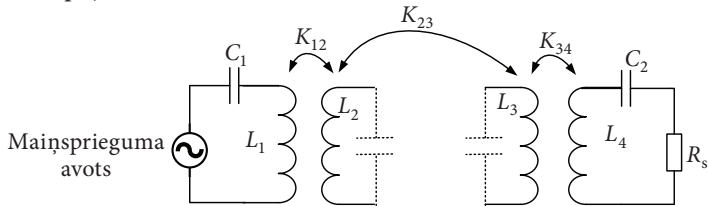
kur K_{12} , K_{23} un K_{34} – saites koeficients starp spoli L_1 un L_2 , starp spoli L_2 un L_3 , starp spoli L_3 un L_4 (sk. 2.20. att.).

Pat ja spoles L_2 un L_3 atrodas tālu viena no otras, ekvivalentais saites koeficients var būt liels, jo tas ir atkarīgs arī no K_{12} un K_{34} . Lai 4 spoļu sistēmai panāktu lielāku lietderības koeficientu, spolēm L_2 un L_3 jābūt ar augstu labumu un pašrezonējošām (bez ārējo kompensācijas kondensatoru pieslēgšanas)³⁸, tāpēc parasti tās tin no resna vada un BEP sistēmas darba frekvence ir MHz diapazonā (piemēram, 13,56 MHz).

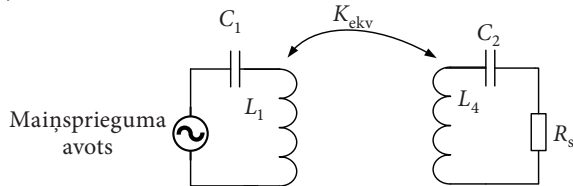
Ja izejā jāiegūst pietiekami liela jauda kopā ar pietiekami augstu lietderības koeficientu, optimālai K_{ekv} vērtībai jābūt vienādai ar 1. Ja K_{ekv} vērtība ir daudzkārt lielāka par 1, tad var iegūt lielu lietderības koeficientu, bet mazu jaudu izejā. [33] Ja K_{ekv} daudzkārt mazāks par 1, tad lietderības koeficients būs zems, bet jauda izejā liela. [33]

38 Ārējo kompensācijas kondensatoru izmantošana kopā ar L_2 ar L_3 ir īpaši nevēlama MHz diapazonā, jo tie var palielināt BEP sistēmas zudumus. Tāpēc labāk rezonanses sistēmā izmantot spoles L_2 un L_3 ar pietiekami lielu paškapacitāti, kas pie sistēmas darba frekvences rezonēs ar iepriekšminētām induktivitātēm.

a) 4 spoļu rezonanses induktīvā BEP sistēma



b) 4 spoļu rezonanses induktīvās BEP sistēmas ekvivalentā shēma



2.20. att. 4 spoļu rezonanses induktīvā BEP sistēma (a) un tās bezzudumu ekvivalentā shēma (b). Piezīme: aizgūts modificētā formā no [33] un [48] ar atļaujām no autortiesību turētājiem.

2.2.3. BEP rezonanses induktīvās sistēmas ar divām spolēm

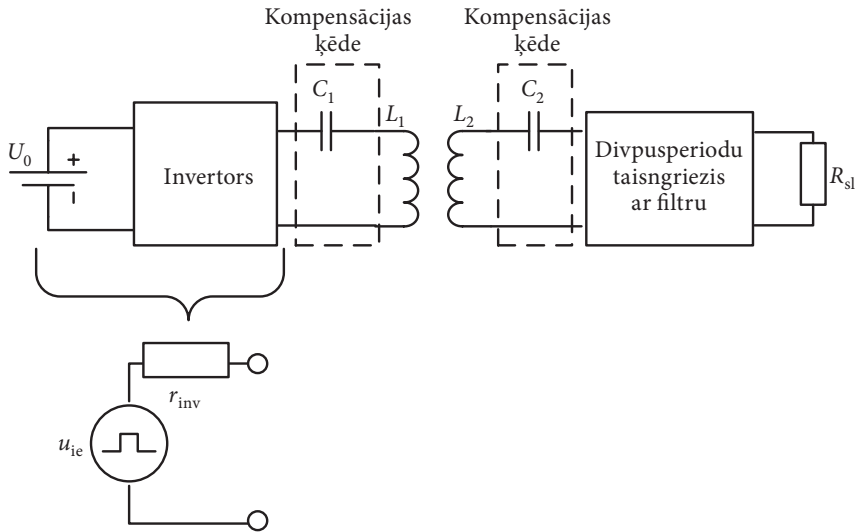
Līdz šim tika analizētas rezonanses induktīvās BEP sistēmas, pieņemot ka raidošā spole ar kompensācijas ķēdi ir pieslēgta sinusoidāla maiņsprieguma avotam (sinusoidālā sprieguma ģeneratoram ar jaudas pastiprinātāju³⁹), bet uztverošā spole ar kompensācijas ķēdi ir pieslēgta rezistīvai slodzei. Rezonanses induktīvās BEP sistēmās raidošo spoli ar kompensācijas ķēdi visbiežāk pieslēdz invertora izejai⁴⁰ (parasti ar taisnstūrveida izejas spriegumu⁴¹) un uztverošo spoli ar kompensācijas ķēdi pieslēdz taisngriezum ar izejas filtrējošo kondensatoru, aiz kā seko slodze (sk. 2.21. att.). Pieņemsim ka analizējamā BEP sistēma ir pieslēgta līdzsprieguma avotam⁴². Tātad rezonanses induktīvā BEP sistēma galvenokārt sastāv no invertora, kompensācijas ķēdes raidošajā daļā, raidošās spoles, uztverošās spoles, kompensācijas ķēdes uztverošajā daļā, taisngrieža ar filtru un invertora vadības bloka (2.21. att. nav parādīts).

39 Šādu pieeju parasti izmanto tikai mazjaudas kHz rezonanses induktīvās BEP sistēmās vai MHz rezonanses induktīvās BEP sistēmās.

40 Šādu pieeju bieži lieto kHz rezonanses induktīvās BEP sistēmās (it īpaši vidējai un lielai jaudai), taču var lietot arī MHz rezonanses induktīvās BEP sistēmās (ar GaN spēka tranzistoriem).

41 Klasiskiem invertoriem (piemēram, D klases pustilta vai pilna tilta invertoriem) ir taisnstūrveida izejas spriegums, bet cita veida invertoriem (piemēram, E klases invertoriem) sprieguma forma var atšķirties no taisnstūrveida formas.

42 Par līdzsprieguma avotu var uzskatīt, piemēram, līdzsprieguma tīklu, akumulatoru bateriju vai taisngriezi ar izejas filtrējošo kondensatoru, pieslēgtu maiņsprieguma tīklam.



2.21. att. Vienkāršas, līdzsprieguma avotam pieslēgtas rezonanses induktīvās BEP sistēmas blokhēma. Piezīme: lai vienkāršotu sapratni, strāvas/sprieguma sensori, bezvadu komunikāciju bloks un invertora vadības bloks nav parādīti.

Atkarībā no darba frekvences un izejas jaudas lieto dažāda tipa invertorus: kHz diapazonā biežāk lieto pustilta vai pilna (H) tilta invertorus (2.22. att.), bet augstākās frekvencēs (MHz diapazonā) biežāk lieto E vai EF klases invertorus. Divlīmeņu pustilta vai trīslīmeņu H tilta invertoru ar līdzsprieguma ieejas avotu var aizvietot ar taisnstūrveida impulsu secības ģeneratoru ar iekšējo pretestību⁴³ r_{inv} (sk. 2.21. att.). Vispārīgā gadījumā invertora izejas spriegumu var izvērst Furjē rindā:

$$u_{inv} = \sum_{n=1}^{\infty} U_{invn} \cdot \sin(2\pi n f_{sw} t + \varphi_n), \quad (2.34.)$$

kur U_{invn} un φ_n – invertora izejas sprieguma n -tās harmonikas amplitūda un fāze; f_{sw} – invertora komutācijas frekvence.

Piemēram, pustilta invertora izejas sprieguma (2.22. att.b) n -to harmoniku amplitūda ir:

$$U_{invn} = \frac{2U_{invm}}{\pi n} \sin n\pi D, \quad (2.35.)$$

bet pilnā tilta invertora izejas sprieguma (2.22. att.a) n -tās nepāra harmonikas amplitūda (pie jebkura impulsu aizpildes koeficienta) ir:

$$U_{invn} = \frac{4U_{invm}}{\pi n} \cos\left(\frac{n\pi}{2}(1-D)\right), \quad (2.36.)$$

43 Pustilta invertoriem par r_{inv} aptuveni var uzskatīt viena tranzistora aktīvo pretestību ieslēgtā stavoklī, bet pilnā tilta invertoriem – divu (vienas diagonāles) tranzistoru aktīvo pretestību ieslēgtā stavoklī.

kur D – impulsu aizpildes koeficients (sk. 2.22. att.);

T – komutācijas periods;

$U_{\text{inv}m}$ – invertora izejas sprieguma maksimālā vērtība.

Piezīme: (2.36.) izteiksmē pāru harmoniku vērtība ir nulle.

Lai labāk izprastu rezonanses induktīvās BEP sistēmas darbības principu, 2.23. att. parādītas svarīgākās laika diagrammas. Tās uzskatāmi parāda: neskatoties uz to, ka invertora izejas spriegums (primārā rezonanses kontūra ieejas spriegums) ir taisnstūrveida formas, primārā un sekundārā rezonanses kontūra strāva (i_1 un i_2) ir sinusoidāla, jo abi kontūri ir saskaņoti rezonansē ($f_{\text{rez}} = f_{\text{rez}1} = f_{\text{rez}2}$). Taisngrieža ieejas spriegums u_{taisn} ir taisnstūrveida formas, jo, kā jau minēts iepriekš, rezonanses induktīvo BEP sistēmu ar virknes-virknes kompensāciju var uzskatīt par strāvas avotu.

Lai vienkāršotu BEP sistēmas shēmas (2.21. att.) analīzi pie f_{rez} un pie frekvencēm, kas nedaudz atšķiras no f_{rez} , rezonanses sistēmas ieejas spriegumu u_{ie} var uzskatīt par sinusoidālu $u_{\text{ie}} = U_{\text{inv}1} \sin(2\pi f_{\text{sw}} t)$. Tā ir tā sauktā pamatharmonikas aproksimācija, ko bieži lieto arī rezonanses pārveidotāju analīzei. Pamatharmonikas aproksimācija dod pietiekami labus rezultātus, ja invertora komutācijas frekvence ir vienāda vai nedaudz atšķiras no sistēmas pamatrezonanses frekvences f_{rez} un ir pietiekami liels rezonanses sistēmas labums. 2.24. att. ir parādīta rezonanses induktīvās BEP sistēmas (ar virknes-virknes kompensāciju) ekvivalentā shēma, izmantojot pamatharmonikas aproksimāciju. Pretestība r_1 ietver zudumus invertorā, raidošajā spolē un vadītājos primārajā kontūrā un raidošās daļas kompensācijas kondensatora ekvivalento virknes aktīvo pretestību. Savukārt r_2 ietver zudumus uztverošajā spolē un vadītājos sekundārajā kontūrā un uztverošās daļas kompensācijas kondensatora ekvivalento virknes aktīvo pretestību.⁴⁴ 2.24. att. ekvivalentajā shēmā u_{ie} atbilst invertora izejas sprieguma pamatharmonikai.

Analizējot rezonanses induktīvās BEP sistēmas, lietderīgi divpusperiodu taisngriezi ar filtru un slodzi aizvietot ar ekvivalento pretestību R_{ekv} sinusoidālai maiņstrāvai (sk. 2.24. att.). [32] Iegūsim rezonanses induktīvās BEP sistēmas ar virknes-virknes kompensāciju izteiksmi R_{ekv} noteikšanai, pieņemot ka sekundārā kontūra strāva ir sinusoidāla un divpusperiodu taisngrieža ieejas spriegums ir taisnstūrveida. Šajā gadījumā taisngrieža ar filtru un slodzi ekvivalento pretestību var izteikt kā taisngrieža ieejas sprieguma pamatharmonikas maksimālās vērtības⁴⁵ attiecību pret tā ieejas strāvas (sekundārā rezonanses kontūra strāvas) maksimālo vērtību:

$$R_{\text{ekv}} = \frac{U_{\text{taisn}1m}}{I_{2m}}. \quad (2.37)$$

44 Šeit pieņemam, ka zudumi taisngriežī ir daudzkārt mazāki nekā uztverošajā spolē L_2 un kompensācijas kondensatorā C_2 .

45 Rezonanses induktīvās BEP sistēmas (ar virknes-virknes kompensāciju) ekvivalentajā shēmā ar pamatharmonikas aproksimāciju taisngrieža ieejas sprieguma pamatharmonika ir vienāda ar spriegumu u_{izekv} uz R_{ekv} (2.24. att.).

Ņemot vērā, ka u_{taisn} ir taisnstūrveida forma (sk. 2.23 att.) un tā maksimālā vērtība ir vienāda ar izejas sprieguma līdzkomponenti U_{iz}^{46} , var iegūt, ka:

$$U_{\text{taisn1m}} = \frac{4U_{iz}}{\pi}. \quad (2.38.)$$

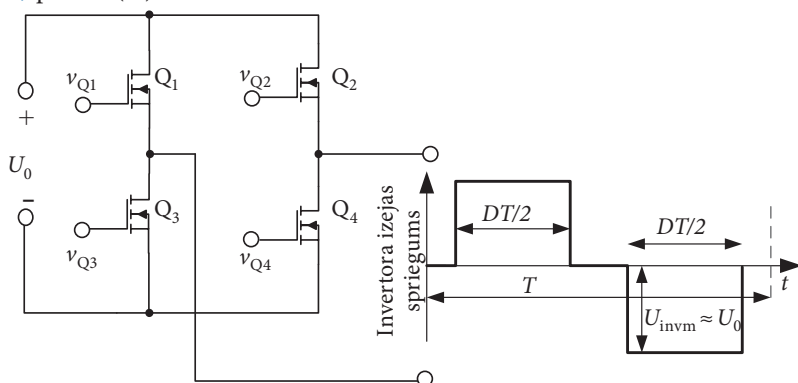
Zinot, ka taisngrieža izejas filtrs būtiski vājina slodzes sprieguma pulsācijas, var uzskatīt, ka BEP sistēmas slodzes sprieguma līdzkomponente U_{iz} ir vienāda ar sekundārā rezonanses kontūra strāvas vidējās taisngrieztās vērtības ($I_{2\text{v tv}}$) un slodzes pretestības reizinājumu:

$$U_{iz} = I_{2\text{v tv}} \cdot R_{sl}. \quad (2.39.)$$

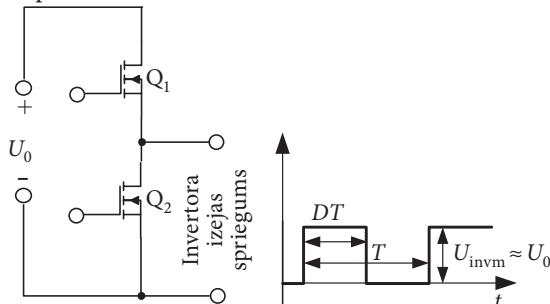
Ņemot vērā, ka sinusoidālās maiņstrāvas vidējā taisngrieztā vērtība ir $2/\pi$ reizes mazāka par maksimālo vērtību ($I_{2\text{v tv}} = 2 \cdot I_{2m}/\pi$), var iegūt izteiksmi taisngrieža ar filtru un slodzi ekvivalentās pretestības izteiksmi:

$$R_{\text{ekv}} = \frac{U_{\text{taisn1m}}}{I_{2m}} = \frac{4U_{iz} \cdot 2R_{sl}}{\pi U_{iz} \cdot \pi} = \frac{8}{\pi^2} R_{sl}. \quad (2.40.)$$

a) pilnais (H) tilts

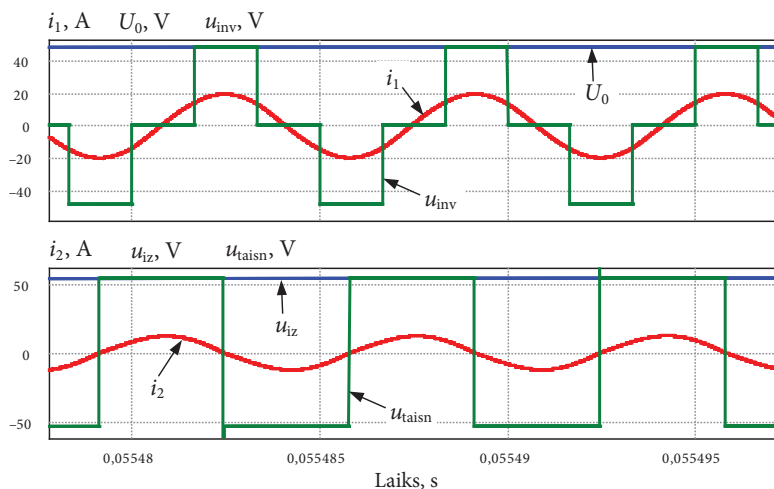


b) pustilts

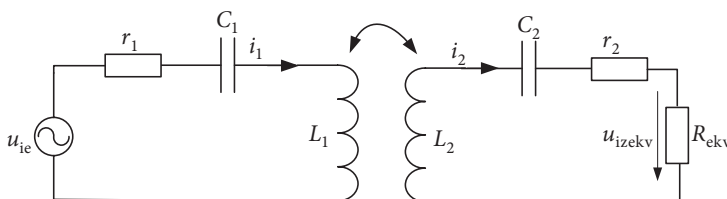


2.22. att. Pilnā (H) tilta (a) un pustilta (b) invertoru vienkāršotā shēma un izejas sprieguma laika diagramma.

46 Šeit pieņemts, ka izejas sprieguma pulsācijas ir niecīgas.



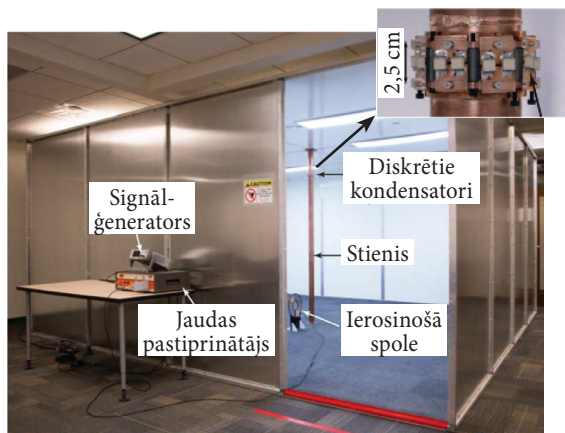
2.23. att. Bezvadamu rezonanses induktīvās BEP sistēmas (2.10. att.) ar pilnā tilta invertoru svarīgākās izejas sprieguma laika diagrammas: u_{inv} – invertora izejas spriegums; i_1 – primārā kontūra strāva; i_2 – sekundārā kontūra strāva; u_{taisn} – taisngrieža ieejas spriegums; u_{iz} – BEP sistēmas izejas spriegums. Parametri: $U_0 = 48$ V; $R_{sl} = 7$ Ω ; $k = 0,15$; $L_1 = L_2 = 25$ μ H; $M = 3,75$ μ H; $C_1 = C_2 = 45,077$ nF; $f = f_{rez1} = f_{rez2} = 150$ kHz.



2.24. att. Rezonanses induktīvās BEP sistēmas (ar virknes-virknes kompensāciju) ekvivalentā shēma, izmantojot pamatharmonikas aproksimāciju. Piezīme: aizgūts modificētā formā no [47] ar atļauju no autortiesību turētāja.

2.3. BEP kvazistatiskā tilpuma rezonanses metode

Kā minēts 1.3. tabulā, 2017. gadā tika piedāvāta kvazistatiskā tilpuma rezonanses (angļu val. – *quasistatic cavity resonance*) metode. Izmantojot šo metodi, tika realizēta elektriskās enerģijas pārvade vairākiem patērētājiem metalizētā istabā (2.25. att.) ar centrā izveidotu metāla stieni ar dažiem diskrētiem kondensatoriem. Blakus strāvu vadošajam stienim tika novietota magnētisko lauku raidoša spole.



2.25. att. Testa istaba kvazistatiskā tilpuma rezonanses metodes realizēšanai. Piezīme: aizgūts no [13] ar atļauju no autortiesību turētāja (raksta autora).

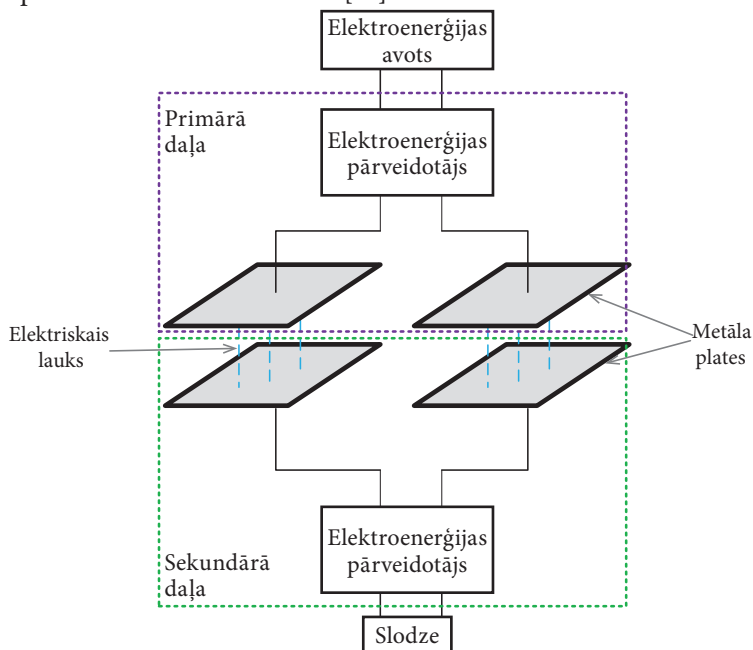
Diskrētie kondensatori samazina rezonanses frekvenci līdz 1,32 MHz. [13] Katra enerģiju uztverošā ierīce bija aprīkota ar magnētisko lauku uztverošu spoli. Ierosinošā spole radīja laikā mainīgu magnētisko lauku, kas inducēja augstfrekvences strāvu stienī, diskrētajos kondensatoros un strāvu vadošos griestos, grīdā un sienās. Pateicoties cirkulejošām strāvām un unikālai testa istabas struktūrai, tika ģenerēts gandrīz homogēns magnētiskais lauks⁴⁷ (kas izplatījās istabas iekšienē). Pateicoties tam, starp uztverošajām spolēm un metalizēto struktūru bija stipra saite, un tika demonstrēta efektīva elektroenerģijas pārveide vidējos attālumos. [13] Kā tika pierādīts [13], minētā metalizētā struktūra veidoja tilpuma rezonatoru, kas darbojas subviļņu režīmā, kurā ģenerējas magnētiskie lauki, kas daudzkrāt stiprāki par elektriskajiem. Rezultātā kvazistatiskā tilpuma rezonanses metode ļauj efektīvi izvairīties no nevēlamās stipro elektrisko lauku ietekmes uz cilvēka veselību, nemazinot spēju pārvadīt nepieciešamo jaudu. [13]

2.4. BEP kapacitatīvā metode

Šajā metodē elektroenerģija tiek pārvadīta ar mainīgu elektrisko lauku. Kapacitatīvās BEP sistēmas galvenās sastāvdaļas ir divi metālisku plašu pāri (kas veido divus kondensatorus) un elektriskās enerģijas pārveidotāji, kas atrodas gan primārajā, gan arī sekundārajā daļā (sk. 2.26. att.). Elektriskās enerģijas pārveidotājs primārajā daļā pārveido līdzspriegumu vai zemākas frekvences maiņspriegumu augstākas frekvences maiņspriegumā, kuru pieliekot starp primārās daļas platēm, elektrostatiskās indukcijas dēļ sekundārajā daļā plūst maiņstrāva. Elektriskās

⁴⁷ Lauka intensitāte samazinājās ar ātrumu $<1/d$, kur d ir attālums no centrālā strāvu vadošā stieņa. [13]

enerģijas pārveidotājs sekundārajā daļā pārveido maiņspriegumu līdzspriegumā. Kapacitatīvās BEP metodi lieto reti, jo tai piemīt būtisks trūkums: lai pārvadītu tādu pašu jaudu kā ar rezonanses induktīvo BEP sistēmu, ir nepieciešams ievērojami augstāks ieejas avota spriegums un frekvence, jo kapacitāte starp metāla plātēm ir diezgan maza (it īpaši pie lielāka attāluma starp plātēm) un jaudas lielums, kuru var pārvadīt ar šo metodi, pieaug, palielinoties frekvencei, kapacitātei un sprieguma kvadrātam. [39] Lai būtu iespēja pārvadīt lielākas jaudas, izmantojot ieejas enerģijas avotu ar zemāku spriegumu un frekvenci, kā arī lai samazinātu nevēlamas reaktīvās strāvas un uzlabotu lietderības koeficientu, līdzīgi kā induktīvās BEP sistēmās, arī kapacitatīvās BEP sistēmās izmanto kompensācijas ķēdes. Viens no visvienkāršākajiem paņēmieniem ir slēgt induktivitātes spoles virknē ar metāla plašu pāriem, piemēram, BEP sistēmas sekundārajā un primārajā daļā. Kompensētas kapacitatīvās BEP sistēmas ar rezonanses ķēdēm sauc arī par rezonanses kapacitatīvām BEP sistēmām. [39]



2.26. att. Kapacitatīvās BEP sistēmas blokshēma.

Rezonanses kapacitatīvā BEP metode ir mazāk populāra nekā rezonanses induktīvā metode, jo tai piemīt vairāki trūkumi:

- tā ir paredzēta šaurākam jaudas diapazonam (maksimālā jauda parasti nepārsniedz dažus kW) nekā rezonanses induktīvā metode, jo lielas jaudas gadījumā spriegums starp metāla plātēm var sasniegt vairākus kV⁴⁸; [40]

48 Piemēram, kā tas ir demonstrēts rakstā [40], pie ieejas avota sprieguma 100 V, izejas jaudas 350 W, attāluma starp plātēm 11 cm un frekvences 1 MHz, spriegums starp metāla plātēm var sasniegt pat 6,5 kV.

- tā ir paredzēta mazākiem pārvades attālumiem nekā rezonanses induktīvā metode, jo pie lielākiem attālumiem kapacitāte starp platēm būtiski kritas, tāpēc nepieciešams vai nu izmantot kompensācijas induktivitātes spoles ar ievērojami lielāku induktivitāti, vai arī būtiski palielināt frekvenci un ieejas avota spriegumu vai plašu pārklāšanas laukumu (it īpaši lielu jaudu gadījumā); [39]
- rezonanses kapacitatīvo BEP sistēmu jaudas blīvums ir zemāks nekā rezonanses induktīvām BEP sistēmām; [39]
- augstas intensitātes elektriskais lauks starp platēm var būt ļoti bīstams dzīvām būtnēm, ja tie iekļūst starp tām.

Rezonanses kapacitatīvās BEP metodes priekšrocības (salīdzinājumā ar rezonanses induktīvo metodi): [39]

- izstarojošās un uztverošās ierīces (metāla plates, piem., no alumīnija) ir vienkāršākas, lētākas, izturīgākas un vieglākas nekā spoles ar ferīta plāksnēm rezonanses induktīvās metodes gadījumā;
- ir iespēja pārvadīt enerģiju, pat ja starp divām platēm ir metālisks objekts.

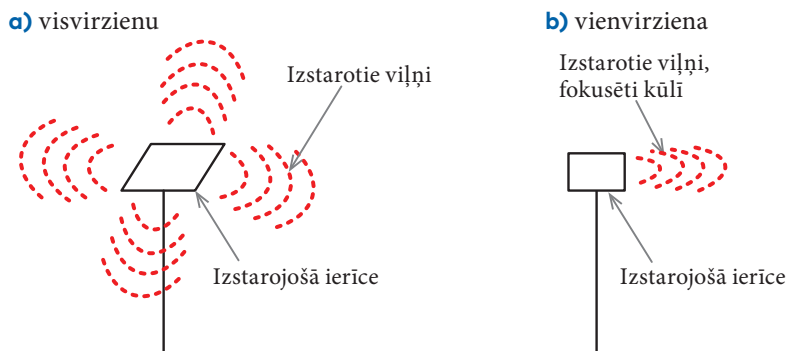
2.5. Tālā lauka elektromagnētiskās enerģijas bezvadu pārvades metodes

Tālā lauka EM enerģijas pārvades metodēm pieskaita enerģijas pārvades metodes ar mikroviļņiem vai optisko starojumu. Atšķirībā no tuvā lauka metodēm, kurām lauka intensitāte un vienlaikus lauka pārvadītā enerģija strauji samazinās, attālinoties no raidošās ierīces, tālo lauku metožu gadījumā, pieaugot attālumam starp izstarojošo un uztverošo ierīci, EM viļņu pārvadītā enerģija samazinās lēnāk.

EM viļņu frekvencei ir ļoti plašs diapazons. Mikroviļņi ir EM viļņi ar frekvenci no 300 MHz līdz 300 GHz, kas atbilst viļņa garumam no 1 m līdz 1 mm. Optiskais starojums (redzamais vai neredzamais) arī ir EM viļņi, tikai ar augstākām frekvencēm nekā mikroviļņiem (ar viļņa garumu diapazonā no 100 nm līdz 1 mm). Ar optisko starojumu saprot infrasarkanā starojumu, redzamo gaismu (jeb vienkārši gaismu) un ultravioletā starojumu.

2.5.1. Elektroenerģijas pārvade ar mikroviļņiem

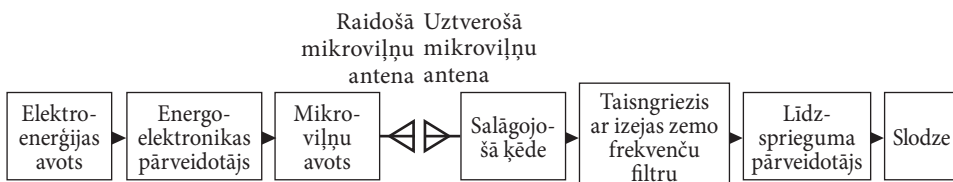
Mikroviļņus izstarojošās ierīces var būt vienvirziena vai visvirzienu (2.27. att.). Vienvirziena izstarojošās ierīces paredzētas fokusēta viļņu kūļa veidošanai enerģijas pārvadei lielos attālos. Savukārt visvirzienu BEP ir paredzēta mazas jaudas pārvadīšanai mazos attālos gadījumos, kad slodzes pozīcija ar uztverošo ierīci nav zināma vai nav kontrolējama vai kad enerģija vienlaikus jāpārvada vairākiem enerģijas patērētājiem.



2.27. att. Tālā lauka BEP.

Lai izveidotu fokusētu mikroviļņu kūli, var izmantot paraboliskās (šķīvju) antenas, ko bieži lieto satelittelevīzijā.

Mikroviļņu BEP sistēma sastāv no energoelektroniska pārveidotāja raidošajā daļā (kas pievada enerģiju mikroviļņu ģeneratoram), mikroviļņu ģeneratora, raidītāja antenas, uztvērēja antenas ar salāgojošo ķēdi, taisngrieža ar zemfrekvences filtru un līdzsprieguma pārveidotāja uztverošajā daļā (2.28. att.). Mikroviļņu BEP var lietot, lai pārvadītu mazas vai lielas jaudas gan mazos, gan arī lielos attālumos (vairāki kilometri). Kā lieljaudas mikroviļņu avotu var izmantot magnetronu, klistronu u. c., bet mazjaudas – lauktranzistorus (piemēram, no GaAs), tuneļdiodes, Ganna diodes u. c.



2.28. att. Vienkāršota blokshēma BEP ar mikroviļņiem.

Galvenie trūkumi, kas piemīt bezvadu elektroenerģijas pārvadei ar mikroviļņiem ir:

- augstu pārvades efektivitāti var sasniegt tikai tiešās redzamības zonā;
- var būt bīstama cilvēku veselībai.

2.5.2. Elektroenerģijas pārvade ar optisko starojumu

Lai ģenerētu optiskā starojuma kūli, var izmantot lāzeru. Lāzers ar speciāla tipa lēcām ļauj iegūt ļoti fokusētu optiskā starojuma kūli. Tātad šai metodei ir liela virziendarbība un liela fokusēta kūļa radišanas spēja. [43] Uztverošās ierīces galvenā sastāvdaļa ir fotoelektriskais pārveidotājs, kas gaismu pārveido elektroenerģijā. Diemžēl fotoelektrisko pārveidotāju lietderības koeficients joprojām ir

mazs (<50 %), tāpēc arī BEP ar optisko starojumu kopējais lietderības koeficients ir pietiekami zems. [6] Neskatoties uz to, ka tā ir interesanta BEP metode, joprojām tā ir eksperimentālā stadijā.

Priekšrocības, kas piemīt BEP ar optisko starojumu (pārvadei ar lāzeru) salīdzinājumā ar BEP ar mikroviļņiem: [42]

- lāzeiem ir nelieli izmēri;
- lāzera stars nerada elektromagnētiskos traucējumus jutīgām elektroniskām ierīcēm.

Trūkumi, kas piemīt BEP ar optisko starojumu (ar lāzeru) salīdzinājumā ar BEP ar mikroviļņiem: [42]

- optiskais starojums var būt bīstamāks par mikroviļņu starojumu;
- mākoņi, lietus, migla u.c. var izraisīt lāzera stara izkliedi un absorbciju, kas savukārt var radīt lielākus enerģijas zudumus nekā mikroviļņiem.

2.6. Bezvadu enerģijas pārvades akustiskās metodes

No audioinženierijas ir zināms, ka skaļrunis elektriskās svārstības pārveido akustiskajos viļņos, bet mikrofons, pretēji skaļrunim, akustiskos viļņus pārveido atpakaļ maiņspriegumā. Šis parādības var izmantot, lai izveidotu BEP sistēmu, kurā enerģijas pārvade notiek ar akustiskajiem viļņiem. Lai netraucētu cilvēkiem, loģiski, ka akustisko viļņu frekvencei jābūt lielākai par 20 kHz. Tātad lietderīgi lietot ultraskaņu, kuru var ģenerēt ar pjezoelektriskiem pārveidotājiem un, izmantojot šos pašus pārveidotājus, pārveidot ultraskaņas viļņus atpakaļ elektriskajās svārstībās. Šī BEP metode joprojām ir eksperimentālā stadijā. Metodes BEP ar ultraskaņu priekšrocības un trūkumi apkopoti 2.1. tabulā

2.1. tabula

Metodes BEP ar ultraskaņu priekšrocības un trūkumi

Priekšrocības [41]	Trūkumi [41]
Nerada elektromagnētiskos traucējumus jutīgām elektroniskām ierīcēm.	To lietderīgi izmantot tikai salīdzinoši nelielam attālumam (līdz 1 m).
Šī BEP metode ļauj iegūt augstāku virziendarbību nekā tā paša izmēra mikroviļņu vai optiskā starojuma izstarotāji.	Var pārvadīt pietiekami mazas jaudas.
Pateicoties daudzkārt mazākām frekvencēm nekā BEP sistēmās ar mikroviļņiem, komutācijas zudumi primārās un sekundārās daļas elektroenerģijas pārveidotājos ir daudzkārt mazāki.	Lietderības koeficients var būtiski samazināties, ja ultraskaņas uztvērējs nav precīzi virzīts uz ultraskaņas kūli.

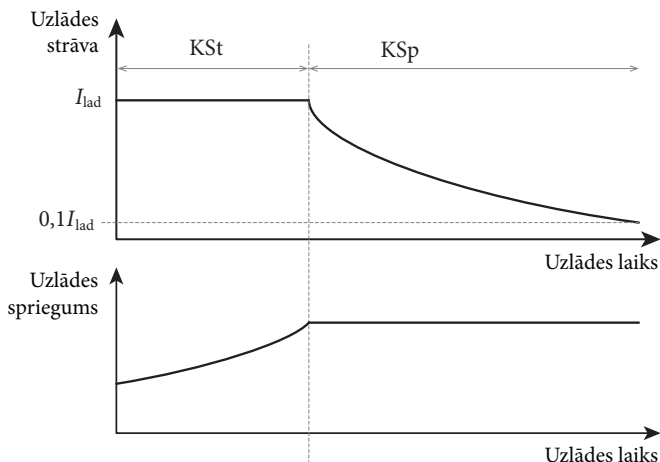
3. AKUMULATORU BATERIJU STATISKĀS BEZVADU UZLĀDES IERĪCES AR REZONANSES INDUKTĪVO SISTĒMU

3.1. Akumulatoru bateriju uzlādes metodes

Dažādās mobilās elektroiekārtās bieži izmanto akumulatoru baterijas, tāpēc pirms runājam par bateriju bezvadu uzlādi jāizprot lādēšanas režīmi. Visizplatītākās ir Li-jonu un Li-polimēru akumulatoru baterijas. Retāk izmanto svina-skābes un Ni-MH akumulatoru baterijas.

Li-jonu, Li-polimēru un svina-skābes baterijas uzlādē divos režīmos: sākumā KSt režīmā (līdz baterijas spriegums U_{bat} sasniedz robežvērtību – maksimāli pieļaujamo spriegumu) ar konstantu strāvu I_{lad} un pēc tam KSp režīmā (līdz lādēšanas strāva sasniedz 10 % no strāvas I_{lad}). 3.1. att. attēlotas vienkāršotas laika diagrammas KSt un KSp režīmam.

Ļoti svarīgi atzīmēt, ka, analizējot BEP rezonanses induktīvās sistēmas KSt/KSp režīmā, akumulatoru bateriju var modelēt kā rezistoru, kura pretestība, akumulatoru bateriju uzlādējot, mainās laikā. [36] Akumulatoru baterijas ieejas ekvivalentā pretestība (R_{bat}) ir tās ieejas sprieguma attiecība pret ieejas strāvu uzlādes procesā. No 3.1. att. liknēm redzams, ka R_{bat} var mainīties plašās robežās (it īpaši KSp režīmā). Piemēram, 10 šūnu Li-jonu baterijai pie uzlādes strāvas 2 A KSt režīmā un uzlādes sprieguma 42 V KSp režīmā R_{bat} var mainīties no 17,5 līdz 210 Ω .



3.1. att. Vienkāršotas laika diagrammas KSt un KSp režīmam.

Ni-MH akumulatoru bateriju uzlāde notiek KSt režīmā. Kad baterijas spriegums un/vai baterijas temperatūra sasniedz sliekšņa vērtību, baterijas uzlāde tiek pārtraukta. Ni-MH akumulatoru baterijas mūsdienās lieto reti, tāpēc nākamajā apakšsadaļā apskatīsim uzlādi KSt/KSp režīmā.

3.2. Akumulatoru bateriju bezvadu uzlādes ierīču darbības princips un blokshēmas

Akumulatoru baterijas Rezonanses induktīvās uzlādes ierīces uzbūve ir sa- režģītāka nekā tas 2.21. att. parādīts vienkāršai BEP sistēmai. Bezvadu uzlādes ierīču blokshēmā jābūt arī vadāmības elektromagnētisko traucējumu filtram (lai mazinātu vadāmības traucējumus), kā arī papildu elektriskām ķēdēm primārajā un/vai sekundārajā daļā (piemēram, līdzsprieguma impulsveida pārveidotājam primārajā daļā) un attiecīgai vadības ķēdei, lai realizētu KSt un KSp režīmu. Maiņstrāvas tīklam pieslēdzamai bezvadu uzlādes ierīcei jābūt arī taisngriežim ar zemfrekvences pulsāciju mazinošu filtru (primārajā daļā aiz traucējumu filtra) vai jaudas faktora korektoram. Ir dažādi paņēmieni, kā realizēt KSt un KSp režīmu. To priekšrocības un trūkumi apkopoti 3.1. tabulā, bet 3.2. att. parādītas bezvadu uzlādes ierīču dažādu KSt un KSp uzlādes režīmu realizācijas paņēmienu blokshēmas.

Kā redzams no 3.1. tabulas un 3.2. att., visus paņēmienus var iedalīt divās pamatgrupās: paņēmieni, kuriem KSt un KSp režīma realizācija notiek primārajā daļā, un paņēmieni, kuriem KSt un KSp režīma realizācija notiek sekundārajā daļā. Ja KSt un KSp režīma realizācija notiek primārajā daļā, tad ir nepieciešama bezvadu komunikācija starp BEP sistēmas izeju un primāras daļas vadības bloku. Bezvadu komunikāciju var nodrošināt, izmantojot:

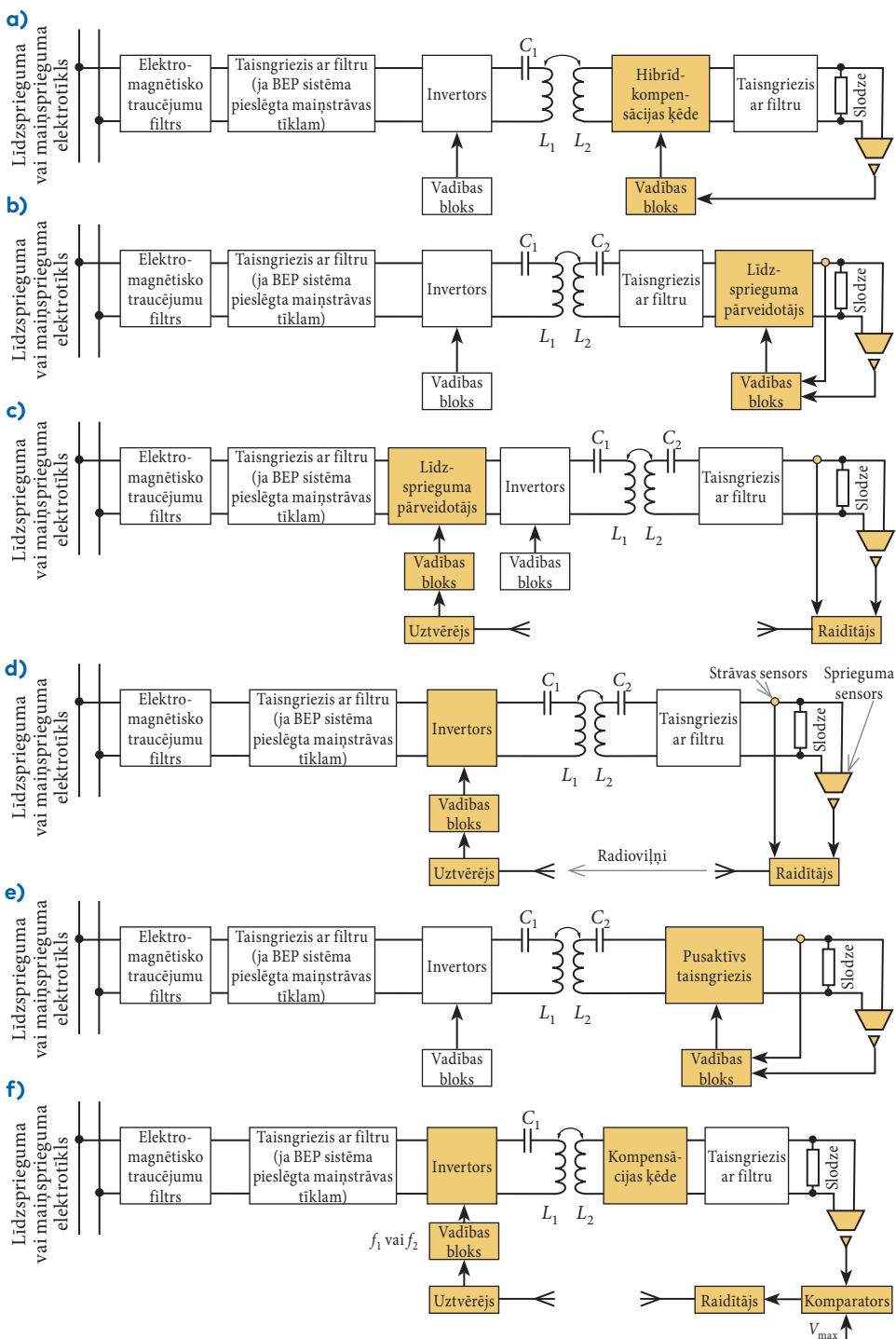
- radioviļņus;
- infrasarkanā starojumu;
- laikā mainīgu magnētisko lauku (caur BEP sistēmas spolēm).

Bezvadu komunikācija, izmantojot radioviļņus ir bieži lietojama (piemēram, izmantojot mikrokontrollerus ar iebūvētu radoraidītāju un radiouztvērēju (transīveri)). Bezvadu komunikācija caur spolēm ir vienkāršāk realizējama un lētāka nekā komunikācija ar radioviļņiem, taču tai piemīt zemāks datu pārraides ātrums un to var izmantot tikai tad, ja saites koeficients nav pārāk zems (pie pietiekami maza attāluma starp spolēm). Bezvadu komunikācija, izmantojot infrasarkanā starojumu, ir pietiekami vienkārši realizējama, bet to var izmantot tikai tiešredzamības gadījumā (dažādi necaurspīdīgi šķēršļi bloķē infrasarkanās gaismas izplatīšanos).

3.1. tabula

KSt un KSp režīma realizēšanas paņēmieni: to priekšrocības un trūkumi [32], [36], [37], [50]

Paņēmieni	Priekšrocības	Trūkumi
(1) Ar līdzsprieguma impulsveida pārveidotāju sekundārajā daļā (3.2. att. b)	Nav nepieciešama bezvadu komunikācija; pietiekami vienkārša vadība	Nav kompakta sekundārā daļa; lietderības koeficients nav īpaši augsts
(2) Ar līdzsprieguma impulsveida pārveidotāju primārajā daļā (3.2. att. c)	Kompakta sekundārā daļa	Nepieciešama bezvadu komunikācija; pietiekami lielas kopējās izmaksas; lietderības koeficients nav īpaši augsts; diezgan komplicēta vadība
(3) Ar pusaktīvu taisngriezi sekundārajā daļā (3.2. att. e)	Nav nepieciešama bezvadu komunikācija; sekundārā daļa kompaktāka nekā 1. un 6. paņēmienam; augsts lietderības koeficients	Sekundārā daļa mazāk kompakta nekā 2., 4. un 5. paņēmienam
(4) Ar primārās daļas invertora frekvences vadību (3.2. att. d)	Kompakta sekundārā daļa	Nepieciešama bezvadu komunikācija; lietderības koeficients nav augsts; darba frekvence var iziet ārpus BEP standartu pieļaujamā diapazona; diezgan komplicēta vadība
(5) Ar primārās daļas invertora impulsa aizpildes koeficienta vadību (3.2. att. d)	Kompakta sekundārā daļa	Nepieciešama bezvadu komunikācija; diezgan komplicēta vadība
(6) Ar hibrīdkompensācijas ķēdi sekundārajā daļā (3.2. att. a)	Nav nepieciešama bezvadu komunikācija; pietiekami vienkārša vadība	Nav kompakta sekundārā daļa; var izmantot tikai šauram saites koeficienta diapazonam
(7) Ar divām darba frekvencēm (3.2. att. f)	Pietiekami kompakta sekundārā daļa; augsts lietderības koeficients	Nepieciešama bezvadu komunikācija (bet vienu reizi jānosūta pārslēgšanas signāls); var izmantot tikai šauram saites koeficienta diapazonam; grūti izveidot BEP sistēmu, kas atbilstu BEP standartiem



3.2. att. Bateriju bezvadu uzlādes ierīču blokhēmas. Piezīme: ar dzeltenu krāsu ir iekrāsotas blokhēmas daļas, kuras ir atbildīgas par KSt/KSp režīma realizēšanu. Piezīme: (d) att. aizgūts modificētā formā no [49] ar atļauju no autortiesību turētāja.

Bezvadu komunikācijas trūkumi:

- palielinās vadības sarežģītības pakāpe;
- palielinās BEP sistēmas kopējās izmaksas;
- augstfrekvences elektromagnētiskie lauki (tai skaitā arī tie, kurus rada BEP sistēmas spoles) var radīt datu pārraides traucējumus, kas var novest pie BEP sistēmas nepareizas darbības un pat avārijas situācijām.

Bezvadu komunikācijas priekšrocības: iespējams samazināt BEP sistēmas sekundārās daļas izmērus (it īpaši lieljaudas BEP sistēmām).

Kā redzams no 3.2. att., visām bezvadu uzlādes ierīcēm ir izejas sprieguma un/vai izejas strāvas sensori. Kā izejas sprieguma sensoru var izmantot vienkāršu rezistīvo sprieguma dalītāju (ar nepieciešamo sprieguma dalīšanas koeficientu), bet kā strāvas sensoru var izmantot mazas pretestības rezistoru (piemēram, 50 mΩ) ar diferenciālo pastiprinātāju (sprieguma kritums uz mazas pretestības rezistora varētu būt nepietiekams, tāpēc ir nepieciešama sprieguma pastiprināšana).

Tagad nedaudz pakavēsimies pie iepriekšminēto bezvadu uzlādes ierīču veidu darbības principiem.

Klasiskais paņēmiens bezvadu lādēšanas ierīču KSp un KSt režīma realizēšanai ir sekundārās daļas līdzsprieguma pārveidotāja izmantošana (3.2. att. b). Par līdzsprieguma pārveidotāju (KSp un KSt režīmu realizēšanai) bieži vien izmanto pazeminošu-paaugstinošu pārveidotāju. Neskatoties uz to, ka šis paņēmiens ļauj iegūt augstas precizitātes KSp un KSt režīmu un nav nepieciešama bezvadu komunikācija, sekundārā daļa nav kompakta⁴⁹ (it īpaši lieljaudas BEP sistēmām), jo tajā ietilpst arī līdzsprieguma impulsvēda pārveidotājs, kas, starp citu, arī palielina kopējās izmaksas un ķēdes elektronisko komponentu skaitu, kā arī samazina kopējo BEP sistēmas lietderības koeficientu.

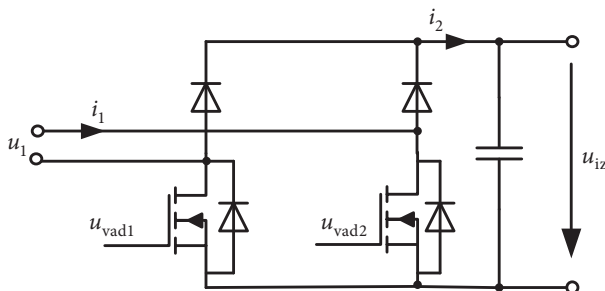
Lai sekundāro daļu padarītu kompaktāku, līdzsprieguma pārveidotāju var likt nevis sekundārajā, bet primārajā daļā⁵⁰ (kā tas ir parādīts 3.2. att. c), taču šis paņēmiens vēl vairāk palielina ķēdes elektronisko komponentu skaitu, kopējās izmaksas un vadības ķēdes sarežģītības pakāpi, jo būs nepieciešama bezvadu komunikācija starp izeju un primārās daļas līdzsprieguma pārveidotāja vadības bloku.

Lai neizmantotu bezvadu komunikāciju, būtiski nepalielinātu kopējās izmaksas un ķēdes elektronisko komponentu skaitu, daži zinātnieki [32] KSt un KSp režīma realizēšanai iesaka sekundārajā daļā izmantot pusaktīvo taisngriezi. Bezvadu uzlādes ierīču blokshēma ar sekundārās daļas pusaktīvo taisngriezi ir attēlota 3.2. att. e. Pusaktīvā taisngrieža izmantošana ļauj samazināt jaudīgu elektronisko komponentu skaitu un sekundārās daļas izmērus salīdzinājumā ar klasisko variantu – ar sekundārās daļas līdzsprieguma impulsvēda pārveidotāju un diožu tiltu, jo pusaktīvais taisngriezis vienlaikus veic divas

49 Ņemot vērā, ka BEP sistēmas sekundārā daļa atrodas uzlādējamās elektroierīces apakšdaļā, tās izmēriem jābūt pietiekami maziem.

50 Izejas spriegums BEP rezonanses induktīvai sistēmai ir tieši proporcionāls primārās daļas invertora ieejas spriegumam.

darbības – maiņsprieguma taisngriešanu un izejas strāvas vai izejas sprieguma regulēšanu. Pusaktīvā taisngrieža shēma redzama 3.3. attēlā. Pusaktīvajā taisngriezī ir divas pusvadītāju diodes (tilta augšējā daļā) un divi tranzistori (tilta apakšējā daļā).



3.3. att. Pusaktīvā taisngrieža shēma. Piezīme: adaptēts no [32].

Viskompaktākā sekundārā daļa ir BEP sistēmām,⁵¹ kuru blokshēma parādīta 3.2. att.d, jo tajā ir tikai diožu tilts ar filtru, kompensācijas ķēde, sensori (ieskaitot strāvas sensora signāla pastiprinātāju) un bezvadu komunikācijas modulis. [32] Rezonanses induktīvās BEP sistēmas izejas spriegumu vai strāvu var regulēt, mainot invertora komutācijas frekvenci (jo sprieguma pārvades koeficienta modulis (2.14.) ir atkarīgs no frekvences) vai impulsu aizpildes koeficientu (jo primārās daļas invertora izejas sprieguma pamatharmonikas amplitūda (2.36.) palielinās, pieaugot impulsu aizpildes koeficientam D). Izmantojot (2.30.), (2.36.) un (2.39.), un pieņemot, ka $r_1(r_2 + R_{\text{bat}}) \ll \omega^2 M^2$, kā arī pieņemot, ka primārās daļas trīs līmeņu invertors ir pilnais tilts un BEP sistēma strādā ar f_{rez} , var pierādīt, ka pie konstantas invertora komutācijas frekvences, BEP sistēmas izejas sprieguma un izejas strāvas līdzkomponentes vērtība ir proporcionāla pilnā tilta invertora impulsu aizpildes koeficienta vērtībai atbilstoši aptuvenām izteiksmēm:

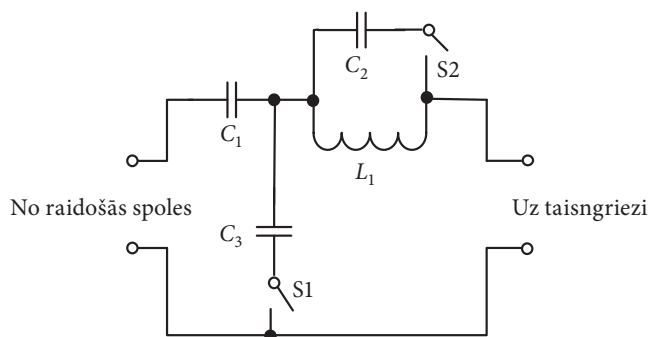
$$U_{\text{iz}} \approx \frac{4U_0 R_{\text{bat}}}{\pi^3 f_{\text{sw}} M} \cos\left[\frac{\pi}{2}(1-D)\right], \quad (3.1.)$$

$$I_{\text{iz}} \approx \frac{4U_0}{\pi^3 f_{\text{sw}} M} \cos\left[\frac{\pi}{2}(1-D)\right]. \quad (3.2.)$$

Kā redzams no šīm izteiksmēm, izejas spriegums un strāva ir nelineāri atkarīga no D . Kā jau minēts 3.1. tabulā, KSt vai KSp režīma realizēšanai ar invertora komutācijas frekvences vadību ir vairāki trūkumi: ir nepieciešama bezvadu komunikācija, pie lielām frekvenču deviācijām BEP sistēma var kļūt nestabila, BEP standarti ļauj strādāt tikai noteiktajos frekvenču diapazonos. [32] Paņēmienu ar invertora impulsu aizpildes koeficienta vadību piemīt mazāk trūkumu, nekā invertora komutācijas frekvences vadībai, taču vienalga ir nepieciešama bezvadu komunikācija un tam ir pietiekami komplicēta vadība. [32]

51 It īpaši lieljaudas BEP sistēmām.

Lai izvairītos no bezvadu komunikācijas un līdzsprieguma pārveidotāja izmantošanas, zinātnieki [36] KSt un KSp režīma realizēšanai piedāvā citu efektīvu risinājumu (3.2. att. a) – izmantot BEP sistēmas sekundārās daļas kompensācijas ķēdes spēju nodrošināt iepriekšminētos uzlādes režīmus. Izrādās, ka pie vienas un tās pašas invertora komutācijas frekvences viena kompensācijas ķēdes topoloģija var nodrošināt KSt režīmu, bet otra – KSp režīmu. Vadība ir ļoti vienkārša – kad baterijas spriegums ir vienāds ar maksimālo uzlādes spriegumu, jāpārslēdzas no vienas kompensācijas topoloģijas uz otru. Viens no iespējamiem hibrīdkompensācijas ķēdes variantiem ir parādīts 3.4. attēlā. Kad slēdzis S1 ir ieslēgts, bet slēdzis S2 ir izslēgts, tad BEP sistēma darbojas KSp režīmā; kad slēdzis S2 ir ieslēgts, bet slēdzis S1 ir izslēgts, tad BEP sistēma darbojas KSt režīmā [36]. Slēdžiem S1 un S2 jābūt divvirzienu slēdžiem (piemēram, pretslēgumā virknē saslēgti lauktranzistori). Šīs metodes trūkums: nav kompakta sekundāra daļa, jo hibrīdkompensācijas ķēde satur papildslēdžus, vairākus kondensatorus un spoli; var izmantot tikai ļoti šauram saites koeficienta diapazonam.



3.4. att. Hibrīdkompensācijas ķēde, lai realizētu KSt un KSp režīmu. Piezīme: adaptēts no [36].

Līdzīgi kā iepriekš aplūkotā metode, arī metodē ar divām darba frekvencēm [50] KSt un KSp režīmu realizēšanai izmanto kompensācijas ķēdes spēju nodrošināt iepriekšminētos uzlādes režīmus. Tikai atšķirībā no hibrīdkompensācijas ķēdes šajā gadījumā izmanto vienu un to pašu kompensācijas topoloģiju (bez papildslēdžu izmantošanas), bet kas strādā pie divām dažādām frekvencēm – pie vienas frekvences realizē KSt režīmu, bet pie otras – KSp režīmu. Pārslēgšana starp režīmiem notiek, kad izejas spriegums sasniedz maksimālo vērtību. Ir nepieciešama bezvadu komunikācija starp sekundāro daļu un primāras daļas invertora vadību. Kad izejas spriegums sasniedz maksimumu, tad sekundārās daļas vadības bloks ar bezvadu komunikāciju nosūta signālu uz primāro daļu, lai notiktu invertora pārslēgšanās no vienas darba frekvences uz otru. [50] Neskatoties uz bezvadu komunikācijas esamību, vadība nav ļoti sarežģīta, jo, realizējot šo vadības metodi, nav nepieciešams nepārtraukti sūtīt informāciju no sensoriem.

Galvenais trūkums: grūti izveidot BEP sistēmu, kas atbilstu BEP standartiem, jo viena no frekvencēm var iziet ārpus maksimāli pieļaujamā frekvenču diapazona.

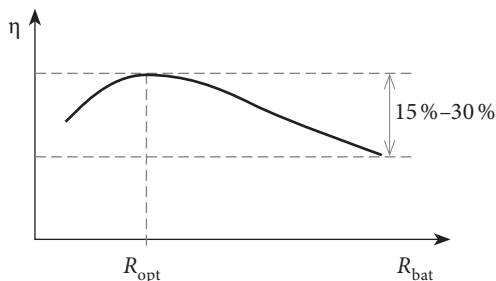
3.3. Akumulatoru bateriju bezvadu uzlādes ierīču lietderības koeficienta uzlabošana konstanta sprieguma režīmā

Ka jau pierādīts 2. nodaļā, maksimālā lietderības koeficienta nodrošināšanai BEP sistēmai jābūt noslogotai ar vienu un to pašu (optimālo) pretestību, taču iepriekš aplūkotās bezvadu uzlādes ierīces to nevar nodrošināt, tāpēc to lietderības koeficients ir ļoti atkarīgs no baterijas ieejas ekvivalentās pretestības, it īpaši KSp režīmā (šajā režīmā R_{bat} mainās daudzkārt plašākās robežās nekā KSt režīmā), un KSp režīmā lietderības koeficients var būtiski samazināties (it īpaši pie lielākiem R_{bat}). Tipiska lietderības koeficienta atkarība no baterijas ieejas ekvivalentās pretestības ir attēlota 3.5. attēlā.

Klasiskais paņēmieni, kā iegūt optimālo lietderības koeficientu pie dažādām R_{bat} un uzlabot to KSp režīmā, ir izmantot divus līdzsprieguma impulsveida pārveidotājus: viens impulsveida pārveidotājs atrodas primārajā daļā, lai nodrošinātu KSt un KSp režīmu, bet otrs – sekundārajā daļā, lai nodrošinātu BEP sistēmas darbību pie optimālas izejas pretestības (sk. 3.6. att.). [37] Par sekundārās daļas impulsveida pārveidotāju biežāk izmanto pazeminošu-paaugstinošu pārveidotāju, kuram ieejas ekvivalentā pretestība ir funkcija no vadības impulsu aizpildes koeficienta un slodzes pretestības: [37]

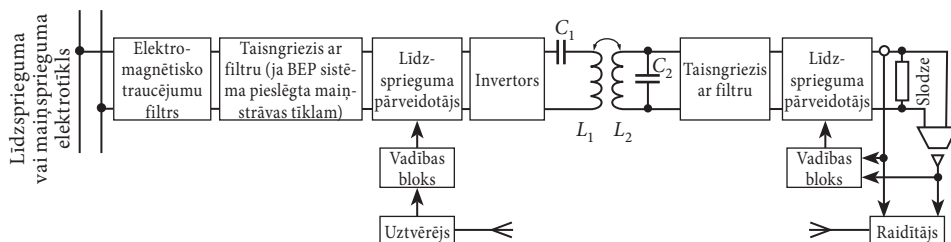
$$R_{\text{ekv_bb}} = \left(\frac{1-D}{D} \right)^2 R_{\text{sl}}. \quad (3.3.)$$

Analizējot (3.3.), ir skaidrs, ka $R_{\text{ekv_bb}}$ atkarībā no D var būt gan lielāks, gan arī mazāks par R_{sl} . Maksimālā lietderības koeficienta noteikšanai ir izstrādāti algoritmi optimālā D noteikšanai pie dažādām R_{sl} un M . Interesenti par tiem var lasīt [32], [37]. Klasiskajam paņēmienu piemīt augsta KSt un KSp režīmu precizitāte, iespēja optimizēt lietderības koeficientu un būtiski uzlabot lietderības koeficientu KSp režīmā, tomēr ir arī trūkumi: liels skaits ķēdes elektronisko komponentu, nav kompakta sekundārā daļa, pietiekami lielas izmaksas. Neskatoties uz to, ka šis paņēmieni KSp režīmā ļauj būtiski uzlabot lietderības koeficientu, tomēr jāsaprot, ka maksimālais lietderības koeficients ir zemāks salīdzinājumā ar lietderības koeficientu bezvadu uzlādes ierīcēm bez lietderības koeficienta optimizācijas (jo tiek izmantoti vairāki līdzsprieguma pārveidotāji).



3.5. att. Tipiskas BEP rezonanses induktīvās sistēmas lietderības koeficients atkarībā no baterijas ieejas ekvivalentās pretestības.

Dažreiz, lai izvairītos no bezvadu komunikāciju bloka⁵² izmantošanas, konstantas strāvas/sprieguma režīma nodrošināšanai un lietderības koeficienta uzlabošanai KSp režīmā izvēlas citu pieeju. Piemēram, rakstā [32], lai kontrolētu akumulatoru baterijas uzlādes procesu, piedāvā uztverošajā daļā izmantot vadāmu pusaktīvo taisngriezi, bet, lai realizētu algoritmu, kas seko maksimālam lietderības koeficienta punktam, piedāvā izmantot fāzes nobīdes leņķa vadību, raidošās daļas invertoram izmantojot “ierosini un skaties” algoritmu, lai meklētu minimālo ieejas līdzsprieguma jaudu, kas atbilst maksimālam lietderības koeficientam.



3.6. att. Viena no iespējamām blokshēmām bezvadu uzlādes ierīcei ar optimizētu lietderības koeficientu. Piezīme: aizgūts no [49] ar atļauju no autortiesību turētāja.

52 Bezvadu sakaru bloka izmantošana ne vienmēr ir vēlama, jo, pārtraucoties bezvadu sakariem, BEP sistēma var darboties nepareizi un pat var izraisīt avārijas situāciju.

ATSAUČU SARAKSTS

- [1] M. Tilbury. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. New York: McGraw-Hill Professional, 2007. ISBN 978-0-07-149737-4
- [2] Tesla N. 1891, *Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and their Application to Methods of Artificial Illumination*, Evening Session at Columbia College, June 20, New York, NY.
- [3] Carlson 2013 *Tesla: Inventor of the Electrical Age*, Ch. 14 & 15, pp. 302–367.
- [4] E. B. Tarrson. *Electric toothbrush which is rechargeable with or without a recharging stand*. US Patent 3379952, Apr. 1968.
- [5] W. C. Brown, “The history of power transmission by radio waves,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, Sep. 1984, pp. 1230–1242.
- [6] S. Aldhaher, “Design and optimization of switched-mode circuits for inductive links,” PhD thesis, 2014.
- [7] P. Glaser, “Power form the Sun: its Future,” *Science*, Vol. 162, No. 3856, pp. 857–861, Nov. 1968.
- [8] M. Treffers, “History, current status and future of the wireless power consortium and the qi interface specification,” *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, 2015, pp. 28–31.
- [9] NASA. *Nasa research team successfully flies first laser-powered aircraft (2003)*. http://www.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/laser_plane.html
- [10] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol.317 No. 5834, June 2007, pp. 83–86.
- [11] A. Salmon. “Korea unveils the ‘future of transport’ — the Online Electric Vehicle | The Times”. *The Times*.
- [12] T. Ishiyama, Y. Kanai, J. Ohwaki, and M. Mino, “Impact of a wireless power transmission system using an ultrasonic air transducer for low power mobile applications,” in *2003 IEEE Symp. Ultrasonics*, vol. 2.IEEE, Oct. 2003, pp. 1368–1371.
- [13] M. J. Chabalko, M. Shahmohammadi, and A. P. Sample. “Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer,” *PLOS ONE*, Vol.12, No.2, 2017, pp. 1–14.
- [14] S. G. Srivani, “Wireless Power Transmission via Solar Power Satellite,” *Electrical India*, July 2019, <https://www.electricalindia.in/wireless-power-transmission-via-solar-power-satellite/>
- [15] AirFuel Alliance mājaslapa: <https://airfuel.org/>
- [16] Wireless Power Consortium mājaslapa: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/about/about-wpc>

- [17] M. Tatton-Brown, "Qi Wireless Charging: What Is It And How Does It Work In Nokia's Lumia 920?," *Wired*, 5 Sept. 2012.
- [18] P. Dubal, "Rezence – Wireless Charging Standard based on Magnetic Resonance," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 4, No. 12, Dec. 2015, pp. 198–200.
- [19] C. Rao and K. Geetha, "Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey," *Indian Journal of Science and Technology*, Vol.9, No.20, May 2016, pp. 1–11.
- [20] Mājas lapa: <https://powermat.com/technology/>
- [21] P. K. Joseph, D. Elangovan, G. Arunkumar, A. A. Zekry, "Overview of Different WPT Standards and a Simple Method to Measure EM Radiation of an Electric Vehicle Wireless Charger," *IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMARC)*, Mumbai, India, 13–15 Dec. 2019.
- [22] <https://www.powermat.com/technology/>
- [23] V. Vanke, H. Matsumoto, N. Shinohara, A. Kita, "High Power Converter of Microwaves Into DC," *Journal of Radioelectronics*, No.9, 1999.
- [24] K. Inoue, K. Kusaka, and J. Itoh, "Reduction in Radiation Noise Level for Inductive Power Transfer Systems using Spread Spectrum Techniques," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, No. 4, April 2018, pp. 3076 – 3085.
- [25] V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov, N. Strzelecka. "Compensation Topologies in IPT Systems: Standards, Requirements, Classification, Analysis, Comparison and Application," *IEEE Access*, vol.7, Aug. 2019, pp. 120559–120580.
- [26] J. Shuttleworth, "New SAE Wireless Charging Standard is EV Game-Changer," *Automotive Engineering Magazine*, October 2020.
- [27] ICNIRP 1998 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>
- [28] ICNIRP 2010 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), <http://www.emfs.info/Related+Issues/limits/specific/icnirp2010/>
- [29] W. Q. Niu, J. X. Chu, W. Gu, and A. D. Shen. "Exact Analysis of Frequency Splitting Phenomena of Contactless Power Transfer Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS*, VOL. 60, NO. 6, JUNE 2013, pp. 1670–1677.
- [30] Y. C. Liu, J. Zhang, C. K. Tse, C. Zhu, and S. C. Wong, "General Pathways to Higher Order Compensation Circuits for IPT Converters via Sensitivity Analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.36, No.9, Sept. 2021.
- [31] B. Pakhaliuk, O. Husev, V. Shevchenko, J. Zakis, and D. Stepins. "Multivariable optimal control of wireless power transfer systems with series-parallel compensation," *Proceedings of the 2019 IEEE 60th International Scientific*

- Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 7–9 October, 2019.
- [32] Z. Li, K. Song, J. Jiang, C. Zhu, “Constant current charging and maximum efficiency tracking control scheme for supercapacitor wireless charging,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 10, Oct. 2018, pp. 9088–9100.
- [33] A. Trivino-Cabrera, and J. Sanchez, “A Review on the Fundamentals and Practical Implementation Details of Strongly Coupled Magnetic Resonant Technology for Wireless Power Transfer,” *Energies*, Vol. 11, No. 10, Sept. 2018, pp. 1–20.
- [34] X. Qu, Y. Jing, H. Han, S. C. Wong, and Chi K. Tse, “Higher Order Compensation for Inductive-Power-Transfer Converters With Constant-Voltageor Constant-Current Output Combating Transformer Parameter Constraints,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 1, Jan. 2017, pp. 394–405.
- [35] M. Machnoor, E. Saturnino Gámez Rodríguez, P. Kosta, J. Stang, and G. Lazzi, “Analysis and Design of a 3-Coil Wireless Power Transmission System for Biomedical Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 67, No. 8, August 2019, pp. 1200–1210.
- [36] R. Mai, Y. Chen, Y. Li, Y. Zhang, G. Cao, Z. He, “Inductive Power Transfer for Massive Electric Bicycles Charging Based on Hybrid Topology Switching With a Single Inverter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 8, August 2017, pp. 5897–5906.
- [37] X. Dai, X. Li, Y. Li and A. P. Hu, “Maximum Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems with Dynamic Coupling Coefficient Estimation,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 6, June 2018, pp. 5005–5015.
- [38] A. Sokolovs. *Bezvadu bateriju lādētāju ar pilnā tilta invertoriem vadāmības traucējumu samazināšana ar izkliedēto spektru*. Maģistra darbs, Rīga, 2023.
- [39] F. Lu, H. Zhang, and C. Mi. “A Review on the Recent Development of Capacitive Wireless Power Transfer Technology,” *Energies*, Vol. 10, No. 11, 2017, pp. 1–30.
- [40] F. Lu, H. Zhang, and C. Mi, “A Two-Plate Capacitive Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 2, Feb. 2018, pp. 964–969.
- [41] V. F. G. Tseng, S. S. Bedair and N. Lazarus, “Phased Array Focusing for Acoustic Wireless Power Transfer,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 65, No. 1, Jan. 2018, pp. 39–49.
- [42] D. Smith, “Wireless power spells end for cables”. *The Observer*, London, Jan. 2009.

- [43] D. E. Raible, "High intensity laser power beaming for wireless power transmission," M.Sc. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Cleveland State University, Cleveland, Ohio state, USA, May 2008.
- [44] W. Lin, R. W. Ziolkowski, "Electrically Small Huygens Antenna-Based Fully-Integrated Wireless Power Transfer and Communication System," *IEEE Access*, Vol.7, 2019, pp. 39762–39769.
- [45] D. M. Vilathgamuwa, J. P. K. Park. *Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs) – Present and Future Trends*. Springer, 2014.
- [46] C. T. Nikhil. "EMI Suppression in Inductive Resonant Wireless Power Transfer Systems Using Variable Pulse Width Technique". Master thesis, Riga, defended in January 2019.
- [47] O. Charles. "Frequency Modulated Inductive Resonant Wireless Power Transfer System with Improved Efficiency". Master thesis, Riga, defended in June 2020.
- [48] A. Karunathilaka. "Wireless Power Transfer in Liquids". Bachelor thesis, Riga, defended in January 2020.
- [49] N. Zaļais. *Induktīva-rezonanses bezvadu elektroenerģijas pārvades sistēma ar divām darba frekvencēm*. Bakalaura darbs. Rīga, 2020.
- [50] L. Yang, Z. Geng, S. Jiang, and C. Wang, "Analysis and Design of an S/PS-Compensated WPT System with Constant Current and Constant Voltage Charging," *Electronics*, Vol.11, No.9, 2022.