

В.Г. КРИЖАНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ АВТОГЕНЕРАТОРІВ СІМЕЙСТВА КЛАСУ Е: ОГЛЯД

Вступ

Автогенератори (АГ) класу Е відносяться до пристроїв генерування високочастотної електромагнітної енергії з великим коефіцієнтом корисної дії (ККД), відрізняються добре розвиненою теорією роботи та використовуються в пристроях промислової електроніки, радіотехніки, системах передачі енергії та інформації, в тому числі і в кіберфізичних системах [1]. Після виходу монографії [1] пройшло п'ять років і за цей час відбувся відчутний прогрес як у галузі розробки цих пристроїв, які утворюють з різновидами цілу сім'ю пристроїв (класи: інверсний Е (Е-1), Е/Ф та інші [2, 3]), так і в розширенні сфери їх застосування. Простота конструкції АГ класу Е обумовлює їхню малу ціну, що особливо важливо для одноразових пристроїв спеціального призначення.

Мета роботи – розгляд стану та тенденцій розвитку АГ сімейства класу Е за останні п'ять років та формулювання питань класифікації цього типу.

Класифікація та принципи побудови автогенераторів класу Е

З'явившись як одна схема [4], АГ класу Е пройшли шлях розвитку конструкцій як високочастотних (ВЧ) автогенераторів до їх сучасного різноманіття, але при збереженні основних принципів роботи – усунення комутаційних втрат (виконання умов нульових напруги та її похідної в кінці інтервалу зачиненого стану транзистора) в ключовому режимі роботи. Завдяки цьому АГ класу Е демонструють високі значення ККД в діапазоні до 10 ГГц та в різноманітних схемних варіантах, від схем на дискретних компонентах до інтегральних схем з проектними нормами 22 нм [1, 5]. В багатьох застосуваннях АГ класу Е можуть замінити каскадну схему «автогенератор-підсилювач потужності» і тому інтерес до цих пристроїв з боку розробників апаратури не знижується. Відносні недоліки АГ класу Е – низька стабільність частоти, складність налаштування на інший режим – продовжує залишатися в центрі уваги розробників, що і демонструють роботи останніх п'яти років, які оглянемо в цій роботі. Близькими питаннями, які мають загальну концептуальну базу з АГ класу Е, є АГ інших режимів роботи, які мають високий ККД – сімейства класів D, F, J та їх гібридних класів. Їх розгляд не є метою даного огляду, але цей матеріал буде корисним для розуміння їх сучасного стану.

Розгляд вже такої розгалуженої галузі, як АГ класу Е, краще проводити за допомогою зрозумілої класифікації. Питання класифікації пристроїв з високим ККД, до яких входять і АГ класу Е, не є простою справою з огляду на історію розвитку галузі, складність фізичних процесів, які покладені в основу класифікації, та інших чинників [6]. В літературі є різна систематизація АГ [1, 2], але корисною може бути і класифікація, яка представлена на рис. 1. Класифікація представлена у вигляді морфологічної таблиці і, відповідно, незаповнені клітини можуть бути вказівкою на створення нових конструкцій АГ.

Пропонується класифікувати АГ за типом кола зворотного зв'язку та структурою вихідної ланки, в таблиці більшість схем стосується схеми автогенератору на одному ключовому елементі, але для деяких рішень можливі і двотактні схеми. Також явно не представлені схеми генераторів зі зворотним зв'язком за рахунок імпедансу у колі стоку транзистора (генератор Колпіца), тому що така схема суперечить ідеї класу Е, і тому теоретично не може мати максимального ККД, хоча її використання можливе в реальних радіотехнічних пристроях, до того ж ця схема може бути краще придатною для реалізації у вигляді інтегральної схеми [1, 14]. Вказівка на конструкцію АГ міститься у розташуванні посилання на рис. 1. Тлумачення вимагають посилання, які відносяться до рядків «інші» – [22, 23, 25 – 29],

це конструкції, які поки існують у одиничних варіантах. У роботі [22] розглядається АГ класу EF2, в якому додано послідовний коливальний контур, що шунтує ключ. Це одне з рішень, яке дозволяє зменшити максимальну напругу на транзисторі та отримати більшу потужність при інтегральному виконанні АГ. Робота [23] описує двотактну схему АГ в інтегральному виконанні, яка має гарні шумові характеристики при високій енергетичній ефективності в діапазоні 4 ГГц. Тут виконання умов режиму класу E дає гарну комбінацію параметрів АГ.

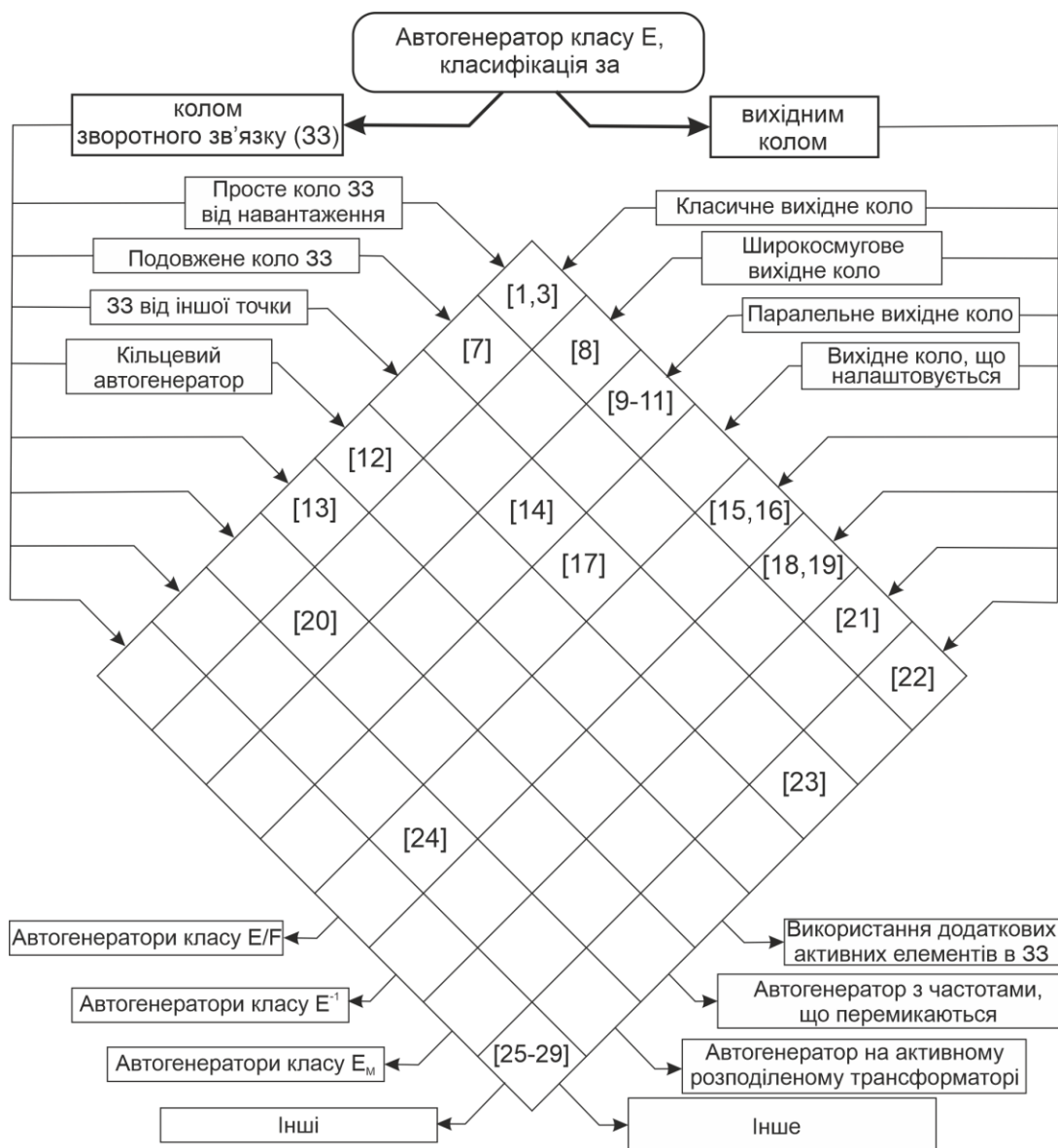


Рис. 1. Класифікація автогенераторів сімейства класу E за структурою вихідного кола та кола зворотного зв'язку

Робота [25] присвячена максимізації діапазону синхронізації АГ класу E, що дозволяє розширити можливості застосування синхронізованих АГ класу E в радіотехнічних, комунікаційних та сенсорних системах. Цікавий різновид АГ класу E розглянуто в [26] – це практично схема автогенератора з індуктивно зв'язаним додатковим резонатором, в який входить навантаження генератора. Вирішується нелінійна задача передати максимальну потужність з високим ККД і при цьому забезпечити виконання вимог до частоти генерації.

В роботі [27] розглядається підключення додаткової резонансної системи – відрізка довгої лінії до затвору транзистора, це дозволяє підвищити стабільність частоти генерації

при дії дестабілізуючих факторів на АГ класу E. В [28] експериментально вивчено роботу двох взаємно синхронізованих АГ класу E в режимах синфазних та протифазних коливань на їх виходах. Це допоможе здійснити просторове складання потужності АГ. У роботі [29] розглянуто автогенератор на безкорпусних GaN транзисторах на частоту 433 МГц для бездротової передачі енергії, цікавим цю роботу робить поєднання кількох граничних параметрів. Потім цей підхід був розвинений в розробці диференціального генератора на більшу потужність [30].

Аналіз діаграми рис. 1 свідчить про те, що увагу дослідників привертають гібридні режими роботи АГ сім'ї класу E – режими класів E/F, зокрема E/F_{mnp}, де індекси свідчать або про номери гармонік, для яких виконуються умови класу «інверсний F» (F-1), або вказують, що умови виконуються для всіх парних гармонік – E/F_{odd}. В роботах [15, 16] розглядаються однокатні генератори класу E/F₃ які мають перевагу в зниженні максимальної напруги стоку транзистора, що важливо для НВЧ транзисторів та інтегральних мікросхем. В роботі [24] розглянуто нову конструкцію автогенератора з високим ККД і виконанням умов класу E (точніше E/F_{odd}) з використанням активного розподіленого трансформатора – пристрою, який об'єднує потужність кількох транзисторів при роботі на спільне навантаження.

Далі розглянемо три конструкції АГ, які цікаві в плані подальшого розвитку цих пристроїв.

Автогенератор класу E/F_{odd} об'єднаний у активному розподіленому трансформаторі

Активний розподілений трансформатор в даному випадку має три пов'язані обмотки – відповідно одна пов'язана з навантаженням, друга складається з двох частин кожного з парціальних автогенераторів, а третя – з двох частин кіл зворотного зв'язку кожного автогенератора. Завдяки такій конструкції забезпечено потрібні фазові співвідношення кожного автогенератора та складання потужності у навантаженні. На рис. 2 показана спрощена схема АГ, за винятком обмотки, що пов'язана з навантаженням, та пасивних елементів кола зворотного зв'язку [24].

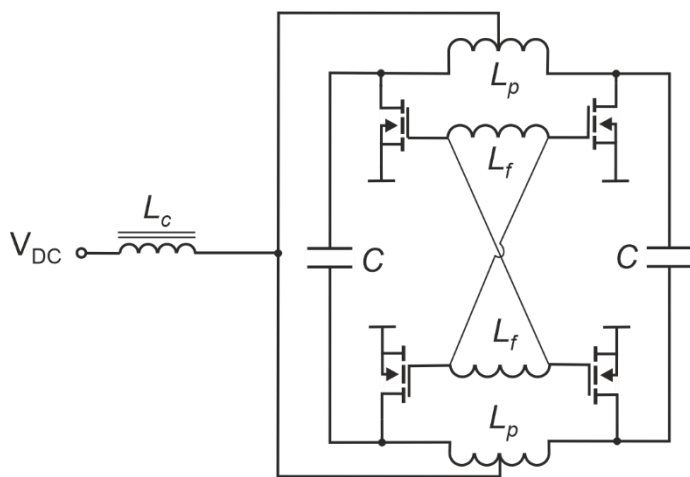


Рис. 2. Схема автогенератора класу E/F_{odd} [24]

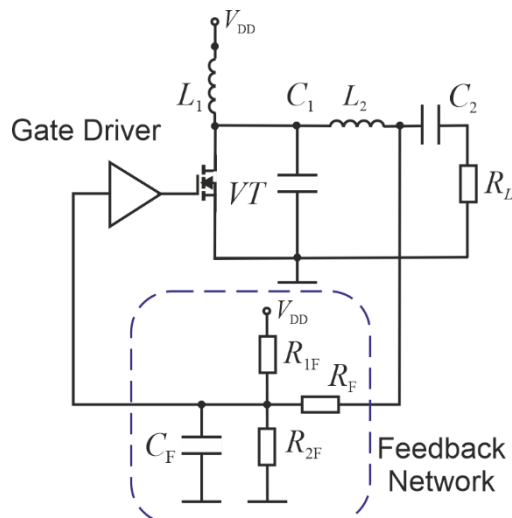


Рис. 3. Схема автогенератора класу E з іншим колом зворотного зв'язку [17]

Перевагами такого АГ є симетрія схеми, – розподілений трансформатор це практично квадратна структура з трьох шарів, що утворюють обмотки, які індуктивним зв'язком передають енергію. Внаслідок цього форми напруги і струмів і транзисторах схожі між собою, що забезпечує високий ККД. Автогенератор на частоті 10,1 МГц має 324 Вт вихідної потужності при ККД 75 %. Принцип роботи та конструкція АГ можуть бути застосовані у мікрохвильовому діапазоні.

Автогенератор, який сам налаштовується на оптимальну роботу

В роботі [17] описано АГ класу Е, що відрізняється іншою принциповою схемою, в якій змінено коло зворотного зв'язку, внаслідок чого при зміні параметрів елементів, що може трапитися, наприклад, внаслідок старіння, майже не змінюється частота генерації і зберігається режим класу Е, а це забезпечує збереження вихідної потужності та ККД. Така схема може бути корисною в перетворювачах енергії та в системах бездротової передачі енергії. На рис. 3 показана принципова схема такого АГ.

Очікуваний ефект роботи досягається вибором параметрів елементів схеми, за рахунок чого фазовий зсув в колі зворотного зв'язку буде майже постійним і тому чутливість до зміни параметрів елементів істотно знижується, це дало підставу авторам роботи [17] назвати конструкцію самонастроюваним АГ класу Е.

Автогенератор, режим роботи якого не залежить від зміни навантаження

Імпеданс навантаження Z_L або його дійсна частина R_L є визначальним для характеристики режиму роботи підсилювачів та автогенераторів з високим ККД. Тому зміна його значення під час роботи, наприклад під впливом високочастотної потужності, призводить до зміни режиму роботи, і, як правило, до зниження ККД та зміни частоти. Існують різні рішення, як запобігти цим негативним наслідкам, – загальне рішення, це створити контур автоматичного регулювання, що потребує суттєвого ускладнення АГ. В роботі [19] надано схему АГ інверсного класу Е (Е-1), який за рахунок свого режиму роботи та деякої зміни кола зворотного зв'язку стає набагато менш чутливим до зміни навантаження. На рис. 4 показано схему такого АГ. Інверсний клас Е є дуальним до звичайного класу Е, тобто замість умови нульової напруги у мить перемикання діє умова нульового струму також при його нульовій похідній. Це відповідає взаємній заміні форм напруги та струму через активний пристрій (транзистор). В схемі на рис. 4 за рахунок паралельного контуру C_0L_2 на навантаженні діє синусоїдальна напруга, амплітуда якої значною мірою визначається напругою живлення V_{DD} і зберігає своє значення при зміні опору навантаження, відповідно не змінюються умови перемикання транзистора і автогенератор зберігає свою частоту. Цьому також сприяє наявність трансформатора L_2, L_3 в колі зворотного зв'язку, який фіксує зсув фаз, що дорівнює π , в колі зворотного зв'язку.

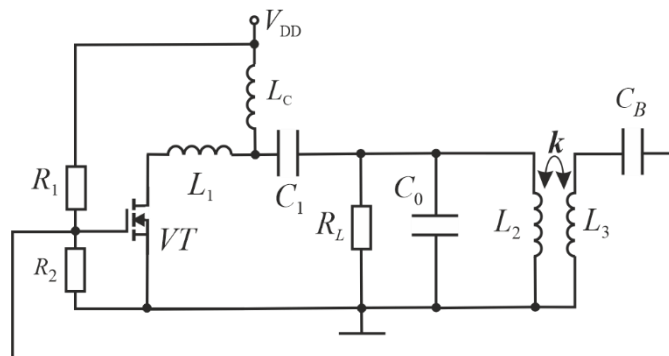


Рис. 4. Схема автогенератора класу Е⁻¹, що не чутливий до навантаження [19]

Таким чином, дана схема [19] реалізує автономні коливання незалежно від змін навантаження та реактивних компонентів схеми. Ці властивості є перевагою в системах бездротової передачі енергії.

Тренди розвитку конструкцій автогенераторів класу Е та їх застосування

Цікавим є той факт, що майже половина джерел, які вказані на рис. 1, опубліковані за останні п'ять років. Це свідчить про потребу в таких пристроях і про появу нових застосу-

вань, де використовуються автогенератори з високим ККД. Зрозуміло, що АГ класу Е – це один з наявних класів пристроїв з високим ККД і конкуренцію їм складають окремі автогенератори та підсилювачі класу Е та інших високоефективних видів, які можуть мати кращу стабільність частоти та можуть бути більш гнучкими в комунікаційних застосуваннях. Власливості пристроїв класу Е – висока енергоефективність, розроблені методики проектування, робота в широкому діапазоні параметрів – обумовлюють їх широке застосування і ця тенденція лише посилюється з розвитком аналогових інтегральних мікросхем, в яких застосовуються режими роботи класу Е [4, 31].

Однією з нових тенденцій є те, що АГ класу Е зараз все більше розробляються для виконання системних вимог та в тісному зв'язку з іншими елементами радіотехнічних [32], технологічних [33 – 35], біомедичних систем [36]. Це можуть бути підсхеми (елементи) для регулювання, частіше всього автоматичного, частоти, вихідної потужності та інше. Нові конструкції АГ класу Е можуть частково робити це без додаткових схем чи контролерів. Хоча, звісно, створення закінченої системи тільки з використанням самого автогенератору доволі складно зробити. Тому багато нових застосувань АГ класу Е саме пов'язані з їх інтеграцією у різні системи, і тут як раз важко провести межу між застосуванням автогенераторів чи підсилювачів класу Е, бо можна використовувати АГ класу Е в режимі синхронізації фактично як підсилювач, але з кращою надійністю або енергоефективністю [1]. Або використовувати контролер пристрою як генератор сигналу, а високочастотну потужність отримувати з виходу підсилювача класу Е.

Висновки

Протягом останніх п'яти років продовжували розвиватися автогенератори класу Е як і інші представники пристроїв з високим ККД, цей розвиток пов'язаний з розширенням їх використання в системах передачі енергії та інформації, в тому числі бездротової, в Інтернеті речей та біомедичних системах. Сучасний стан цих пристроїв дозволяє створювати джерела високочастотної енергії на частотах до мікрохвильового діапазону з потужністю від міліват до кіловат з різним виконанням. Тенденцією розвитку цих пристроїв є розробка конструкцій, які налаштовані під різні галузі застосування.

Запропоновано варіант класифікації автогенераторів класу Е, який вказує на можливі напрями розвитку цієї галузі техніки. Ці пристрої можуть бути застосовані для розробки енергоефективних пристроїв кіберфізичних систем та систем спеціального призначення.

Список літератури:

1. Крижановський В.Г., Макаров Д. Г., Чернов Д. В., Крижановський В. В. Автогенератори класу Е ; за ред. В. Г. Крижановського / ДонНУ ім. Василя Стуса. Вінниця : Нілан-ЛТД, 2017. 220 с.
2. Grebennikov A., Franco M. J. (2021) Switchmode RF and Microwave Power Amplifiers Third edition. Academic Press. 819 p.
3. Kazimierczuk M. (2014). RF Power Amplifiers. Second edition. Wiley. 687 p.
4. Ebert J., & Kazimierczuk M. Class E high-efficiency tuned power oscillator // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 16(2). P. 62 – 66. <https://doi.org/10.1109/jssc.1981.1051542>
5. Seidel A., Wagner J., and Ellinger F. (2022). Polar Transmitter with Pseudo-Differential Inverse Class-E Output Stage in 22 nm FD-SOI // 14th German Microwave Conference (GeMiC). 01 – 04.
6. Крыжановский В.Г., Прилипская А.С. О классификации транзисторных усилителей мощности // Прикладная радиоэлектроника. 2010. Т. 9(4). С. 554 – 561.
7. Makarov D.G., Kryzhanovskiy V.V., Chernov D.V. (2016) Class E oscillator with electrically elongated feedback network // 2016 Intern. Conf. Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). P.1 – 3. doi: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739617.
8. Крыжановский В.Г. Автогенератор класса Е с расширенной полосой перестройки // Радиотехника. 2013. Вып. 175. С. 184 – 188.
9. Kurumizawa T. & Koizumi H. (2021) Voltage-Source Parallel Resonant Class E Oscillator // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 1 – 5. doi: 10.1109/ISCAS51556.2021.9401750.
10. Yamashita Y. & Wada K. (2017) Wireless power transmitter using parallel-tuned class-E power oscillator // International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). 287 – 290. doi: 10.1109/ISESD.2017.8253350.

11. Matsuhashi S., et al., (2020) Load-Independent Self-Tuned Parallel Resonant Power Oscillator // 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 1571 – 1576. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9236069.
12. Крыжановский В.Г., Охрименко Ю.Г., Чернов Д.В. Анализ области устойчивой работы кольцевого автогенератора класса E // Радиотехника. 2013. Вып. 175. С.189 – 194
13. Ahmadi M. M. & Pezeshkpour S. (2020). A Self-Starting Class-E Power Oscillator with an Inverting Gate Driver // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 67(10). 8344 – 8354. <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2949533>
14. Laskovski A. N. & Yuce M. (2010). Class-E oscillators as wireless power transmitters for biomedical implants. In E. Cianca (Ed.) // 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies 2010. Pp. 1 – 5. IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/ ISABEL. 2010. 5702913
15. Inaba T. & Koizumi H. (2018). Class E/F₃ Tuned Power Oscillator // IEEE Transactions on Power Electronics. 33(2). 1420–1427. <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2686900>
16. Krizhanovski V.G., Chernov D.V., Grebennikov Andrei. (2018) Low-Voltage Class E/F₃ High Frequency Oscillator // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, Lviv-Slavske, Ukraine. 607 – 611. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336275
17. Ahmadi M. M., & Salehi-Sirzar M. (2019). A Self-Tuned Class-E Power Oscillator // IEEE Transactions on Power Electronics. 34(5). 4434 – 4449. <https://doi.org/10.1109/tpel.2018.2859387>
18. Cantu H. I., Mury T., Fusco V.F. (2007) Inverse Class E amplifier and oscillator phase noise characteristics. European Microwave Conf., 9-12 Oct. 2007: proc. Munich, Germany. 740 – 742.
19. Komiyama Y., Matsuhashi S., Zhu W., Nguyen K., Uematsu T., Ito Y., Mishima T., & Sekiya H. (2022). Wireless power transfer system with load-independent inverse class-E oscillator // Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 13(2). 465 – 470. <https://doi.org/10.1587/nolta.13.465>
20. Krizhanovski V., Kryzhanovskiy V., Grebennikov A., (2020) Class E oscillator with two switchable frequencies // IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020), IEEE. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235576
21. Miyahara R., Wei X., Nagashima T., Kousaka T. & Sekiya H. (2012). Design of Class-E_M Oscillator with Second Harmonic Injection // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 59(10). 2456 – 2467. <https://doi.org/10.1109/tcsi.2012.2188936>
22. Madureira H., Deltimple N., Kerhervé E., Haddad S. (2013) Design of a class EF₂ power oscillator for RF communication application // IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS). 763 – 766.
23. Barzgari M., Ghafari A., Nikpaik A. & Medi A. (2021). Even-Harmonic Class-E CMOS Oscillator // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1594 – 1609. <https://doi.org/10.1109/jssc.2021.3124971>
24. Apperley T., Nielsen J. & Okoniewski M. (2020). A Class E/F_{odd} Power Oscillator Incorporating a Distributed Active Transformer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 68(6). P. 2409 – 2418. <https://doi.org/10.1109/tmmt.2020.2977898>
25. Yabe Y., Tanaka H.-A., Sekiya H., Nakagawa M., Mori F., Utsunomiya K., & Keida A. (2020). Locking Range Maximization in Injection-Locked Class-E Oscillator – A Case Study for Optimizing Synchronizability // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 67(5). 1762 – 1774. <https://doi.org/10.1109/tcsi.2019.2960847>
26. Ardila V., Ramirez F. & Suarez A. (2021). Nonlinear Analysis of a High-Power Oscillator Inductively Coupled to an External Resonator // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 31(6). P. 737 – 740. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2021.3064246>
27. Kryzhanovskiy V., Chernov D., Makarov D. & Krizhanovski V. (2022). A Simple Method to Increase the Stability of a Class E Power Oscillator // 2022 IEEE 16th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). pp. 785 – 788. doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766864.
28. Krizhanovski V., Makarov D., Kryzhanovskiy V. & Grebennikov, A. (2021) Mutual synchronization of class E oscillators // IEEE 5th Int. Conf. on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) 254 – 257. doi: 10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716687.
29. Rezk T. M., Fahmy G. A., Ibrahim S. A. & Ragai H. F. A 433 MHz e-GaN HEMT based Power Oscillator for Far Field Wireless Power Transfer // 2020 8th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations (JAC-ECC). 2020. 80 – 83. doi: 10.1109/JAC-ECC51597.2020.9355883.
30. Rezk T. M., Fahmy G. A., Ibrahim S. A. & Ragai H. F. (2021). Design of a differential power oscillator for 433 MHz WPT using e-GaN HEMTs // Ain Shams Engineering Journal. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.008>
31. Saheb Z. & El-Masry E. (2019). An energy-efficient and ultra-low-voltage power oscillator in CMOS 65 nm // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. doi:10.1007/s10470-019-01431-z
32. Makhoul R., Zhuang J., Maynard X., Perichon P., Frey D., Jeannin, P.-O. & Lembeye, Y. (2019). A Very High Frequency Self-Oscillating Inverter Based on a Novel Free-Running Oscillator // IEEE Transactions on Power Electronics. 34(9). 8289 – 8292. <https://doi.org/10.1109/tpel.2019.2904886>
33. Jarndal A. & Petrovic T. (2018) GaN-Based Oscillators for Wireless Power Transfer Applications // 2018 International Conference on Advanced Computation and Telecommunication (ICACAT). 1-5. doi: 10.1109/ICACAT.2018.8933533

34. Jong-Ryul Yang, (2018) A Class E Power Oscillator for 6.78-MHz Wireless Power Transfer System // *Electr Eng Technol.* 13(1): 220 – 225.
35. Phaebua K., Lertwiriya-prapa T., Boonpoonga A., Rattana-rungngam D. & Torrungrueng, D. (2022) An Experimental Study of Effect of Dielectric Materials on Wireless Power Transmission at 6.78 MHz // 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 1–4. doi: 10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795554
36. Ahmadi, M. M., Pezeshkpour, S., & Kabirkhoo, Z. (2021). A High-Efficiency ASK-Modulated Class-E Power and Data Transmitter for Medical Implants // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tpe1.2021.3092829>

Надійшла до редколегії 05.03.2023

Відомості про авторів:

Крижановський Володимир Григорович – д-р техн. наук, професор, Донецький національний університет імені Василя Стуса (м. Вінниця), професор кафедри прикладної математики та кібербезпеки; Україна; email: v.krizhanovski@donnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2685-9740>