

О. А. Серков, В. С. Бреславець, Ю. В. Бреславець, І. В. Яковенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ АПАРАТУРИ ЗВ'ЯЗКУ

Анотація. Предметом є процеси аналізу і механізми виникнення оборотних і необоротних відмов напівпровідникових комплектуючих апаратури зв'язку, зумовлених впливом струмів і напруг, наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням, на працездатність електрорадіовиробів. **Метою** є модель виникнення оборотних відмов напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів, які обумовлені взаємодією наведених токів з електростатичними коливаннями напівпровідникової свєрхрешітки. **Методами, що використовуються** є визначення спектру власних коливань системи: наведені електромагнітним випромінюванням струми - власні коливання комплектуючих радіовиробу, визначені методом теорії малих обурень. **Отримані наступні результати:** Отримано розрахункові співвідношення, що пов'язують величину інкременту нестійкостей (критерій оборотних відмов) з величиною наведених струмів та параметрами шаруватих структур: концентрацією вільних носіїв, діелектричною проникністю, розмірами структури. Визначено параметри стороннього імпульсного електромагнітного поля, наведених струмів та робочих характеристик напівпровідникових приладів, в рамках яких спостерігається режим посилення власних коливань напівпровідникової структури. Визначено механізми появи оборотних відмов виробів напівпровідникових комплектуючих радіовиробів за умов впливу сторонніх імпульсних електромагнітних полів. Встановлено, що наявність наведеного зовнішнім випромінюванням струму призводить до встановлення режиму посилення власних коливань напівпровідникових комплектуючих радіовиробу (зворотним відмова). **Висновок.** Порівняльний аналіз, отриманих у роботі розрахункових даних може бути використаний при виготовленні радіовиробів, що працюють у міліметровому та субміліметровому діапазоні (підсилювачів, генераторів та перетворювачів частоти). Оцінки режимів посилення (генерації) коливань напівпровідникових приладів, що спотворюють їх робочі характеристики залежно від параметрів зовнішнього електромагнітного впливу, дозволяє визначати можливості електромагнітної сумісності апаратури зв'язку НВЧ-діапазону.

Ключові слова: апаратура зв'язку, наведений струм, електромагнітне випромінювання, напівпровідникові комплектуючі, поверхневі коливання, нестійкість коливань.

Вступ

Розширення областей застосування та зростання складності завдань, виконання яких покладається на засоби зв'язку призводять до підвищення їхньої чутливості, а отже, до збільшення залежності працездатності комплектуючої апаратури від впливу зовнішніх факторів (зокрема електромагнітного випромінювання).

Як відомо [1], найбільш чутливі до впливу зовнішніх електромагнітних полів напівпровідникові прилади (ПНП) та інтегральні мікросхеми (ІМС). Відмови цих виробів зазвичай пов'язані з електричними (величина та розподіл струмів у структурі приладів) та тепловими (підвищення температури окремих ділянок структури) [2]. Тому, значний вплив на працездатність такого роду електрорадіовиробів, надають напруги наведені зовнішнім випромінюванням.

В основному дослідження впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на електрорадіовироби відносяться до галузі незворотних відмов. (Всі типи відмов, прийнято розділяти на оборотні та незворотні [1, 2]). Для незворотних відмов характерна повна втрата працездатності. Вони настають, коли зміна робочих характеристик апаратури перевищує допустимі межі (при дії зовнішнього електромагнітного випромінювання незворотні відмови, зазвичай виникають внаслідок теплового пробою комплектуючих).

Моделювання незворотних відмов, що виникають як результат взаємодії струмів та напруг, наведених ЕМІ, з процесами, що характеризують функціональне призначення радіовиробів, проводиться в рамках теорії ланцюгів із розподіленими параметрами. Це дозволяє оцінити критерії працездатності в цілому (наприклад, оцінити критичну енергію, що характеризує тепловий пробій),

У той же час, для оборотних відмов, що характеризуються тимчасовою втратою працездатності, використання теорії ланцюгів не дозволяє визначати спотворення вихідних параметрів радіовиробів. Тому більшість питань, пов'язаних з впливом ЕМІ на працездатність виробу в області оборотних відмов залишаються відкритими. Ця робота певною мірою компенсує існуючу прогалину в дослідженнях як оборотних, так і незворотних відмов.

Результати досліджень

У статті досліджено механізми взаємодії наведених зовнішнім випромінюванням струмів з процесами, що визначають функціональне призначення радіовиробів.

Крім того, отримані розрахункові співвідношення, що визначають ступінь впливу зовнішніх імпульсних полів на працездатність напівпровідникових приладів.

Слід зазначити, що вплив на найпростіші типові схеми радіо- та електротехнічного обладнання технічних засобів (ТЗ), що містять напівпровідни-

ві прилади та мікросхеми, електричних полів з напруженістю близько 20 кВ/м та магнітних - 100 А/м, вже супроводжується короткочасними (оборотними) порушеннями їх працездатності [3].

Аналіз відмов виходу з експлуатації ТЗ показав [2], що вплив електромагнітних полів з рівнями електричного поля до 100 кВ/м і магнітного поля до 600 А/м, не призводить до структурних пошкоджень матеріалів виробів електронної техніки і не викликає деградації їх параметрів.

Тому наведені рівні величин електромагнітних полів визначають області як оборотних, так і незворотних відмов.

1. Незворотні відмови. Основною характеристикою, що визначає межу працездатності НПВ (область необоротних відмов) при впливі наведених імпульсних струмів і напруг, спричинених ЕМІ є імпульсна електрична міцність [8]. НПВ даний параметр визначається як найбільше значення зворотної напруги та відповідного йому зворотного струму, що передреє перекриттю р-п переходу.

Як правило, величина електричної міцності визначає ту кількісну межу експлуатаційних характеристик НПВ, після якого спостерігається вихід з ладу приладу.

При цьому вторинний тепловий пробій, який спостерігається у всіх типах напівпровідникових приладів [7], виступає основною причиною відмови напівпровідникових приладів..

Вторинний тепловий пробій р-п переходів НПВ при прямому зміщенні це результат теплової нестабільності в локалізованих областях напівпровідникової структури. При зворотному зміщенні р-п переходів виникнення вторинного пробою є результатом появи лавинного струму при високих напругах і його пов'язують з локальним перегрівом в області р-п переходу.

Зворотно-зміщені р-п переходи приладів є найбільш критичними до впливу імпульсних струмів і напруг. Це пов'язано з невеликими розмірами активних областей і великий теплової постійної часу для матеріалів [7, 8].

Оскільки велика кількість енергії розсіюється на околицях активних областей р-п переходів і постійна теплова часу велика в порівнянні з тривалістю імпульсу ЕМІ, тепло під дією ЕМІ виділяється на малій площі, а температура в цій області стає досить високою аж до температури плавлення матеріалів.

Це призводить до між переходом і суміжними областями великого температурного градієнта, тобто пошкоджень, викликаних плавленням матеріалів, та теплового пробою.

Стійкість напівпровідникових приладів до дії імпульсних полів можна характеризувати також граничною енергією, виділеною в приладі [8].

Енергія, при виділенні якої в приладі за час дії імпульсу перенапруги хоча б один з параметрів приладу виходить за норми, називається пороговою енергією ушкодження.

Для імпульсної напруги з тривалістю імпульсу $\tau_n \leq 0,1$ мкс ця енергія стала і її називають критичною енергією пошкодження [8].

Більшість методик оцінок критеріїв працездатності напівпровідникових приладів, що використовуються на даний час, в умовах впливу стороннього електромагнітного випромінювання [4, 7] визначає критичну енергію $W_{кр}$, що викликає відмову виробу наступним чином:

$$W_{кр} = U_L I_L \Delta t_{\min}, \quad (1)$$

де $U_L I_L$ - відповідно напруга та струм лавинного пробою, Δt_{\min} - мінімальний час розсіювання наведеної електромагнітним випромінюванням потужності (розвитку пробою).

Критична енергія імпульсу, що викликає відмову напівпровідникового приладу не залежить від тимчасових параметрів імпульсу, що впливає перенапруги, а визначається фізико-конструктивними параметрами р-п переходів і питомими опорними високочастотних областей [8].

Існує ряд методик наближених оцінок рівнів потужності пошкодження виробу. До них відноситься робота [4], де для діодів і транзисторів була отримана залежність питомої пробійної потужності струму, що проходить через р-п-перехід, від тривалості імпульсу

$$P_{кр}/S = f(\tau),$$

де $P_{кр}$ - потужність струму, що проходить через поперечний переріз (S) р-п-перехода, при якому відбувається катастрофічна відмова діода (транзистора); τ - тривалість прямокутного імпульсу).

Відповідна залежність називається залежності (кривий) Вунша - Белла і представлена на рис. 1.

На рис. 1 у логарифмічному масштабі наведено теоретичні та експериментальні залежності питомої пробійної потужності від тривалості прикладеного прямокутного імпульсу [5].

Для опису експериментальних даних авторами було отримано розрахункову формулу залежності питомої порогової потужності (P/S , кВт/см²) відмов р-п-переходів від тривалості імпульсу (t, мкс):

$$P/S = K_d \cdot t^{-1/2}, \quad (2)$$

де K_d - коефіцієнт деградації, отриманий на підставі експериментальних даних [5].

У роботі [7] наводяться експериментальні та теоретичні (розраховані на підставі напівемпіричних формул) результати досліджень стійкості діодів при подачі на них напруг, відмінних формою від прямокутних імпульсів.

Наведені експериментальні дані загалом задовольняли критерію Вунша-Белла.

2. Зворотні відмови Об'єктом дослідження запропонованої фізичної моделі оборотних відмов є шарувата напівпровідникова періодична структура.

Структури такого роду використовуються як перетворювачі частоти в апаратурі зв'язку [3].

Зовнішнє електромагнітне поле формує струм (потік заряджених частинок), причому напруженість електричного поля спрямована за нормаллю до верхніх структури.

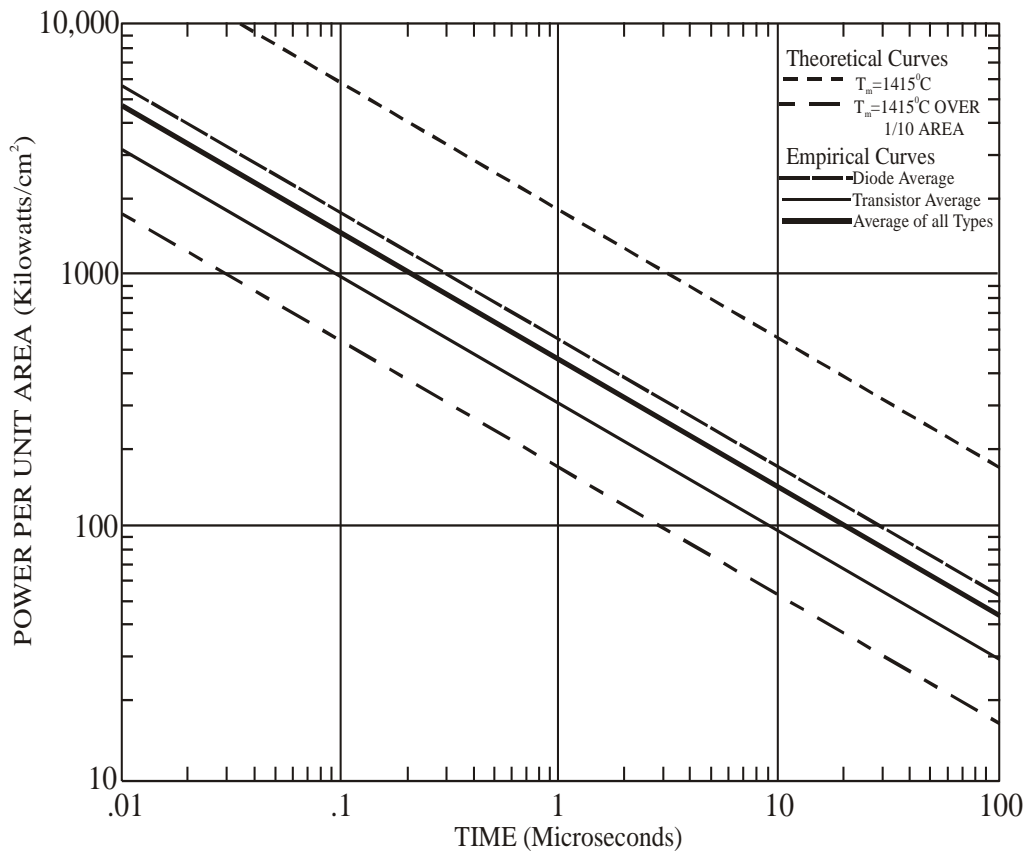


Рис. 1. Залежність граничної потужності від тривалості електромагнітного імпульсу (залежність Вунша-Белла) [3]

Розглянемо взаємодію потоків заряджених частинок, наведених електромагнітним полем, з хвильовими процесами в шаруватих напівпровідникових структурах, що використовуються в сучасній НВЧ – електроніці.

Визначимо спектр та згасання (наростання) електромагнітних коливань такої системи.

Вибираємо систему відліку таким чином, щоб осі X, Y були спрямовані паралельно, а вісь Z – перпендикулярно межі розділу.

Зауважимо, що втрати енергії зарядженої частки під час проходження через шаруватий діелектрик вперше розглядалися у роботі [3].

Нехай моноенергетичний нейтральний потік заряджених частинок із щільністю n_0 проходить із постійною швидкістю v_0 через періодичну структуру (період q), що складається з плазмових шарів, що чергуються d_1, d_2 та розрізняються діелектричними постійними концентраціями електронів провідності N_{01}, N_{02} .

Для опису електромагнітних властивостей структури, що складається з плазмових шарів, у нехтуванні ефектами запізнення, скористаємося системою рівнянь Максвелла та гідродинаміки. На межі шарів виконуються умови безперервності потенціалів та повних струмів.

Представляючи залежність всіх змінних величин від координат та часу експоненційною, отримаємо розв'язання рівнянь у кожному шарі.

За допомогою граничних умов виключимо невизначені константи та отримаємо дисперсійне рівняння, що зв'язує між собою частоту, хвильові вектори - $\omega, q_{x,y}, k$ та параметри середовища.

$$\cos(\omega/v_0 - k)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (3)$$

Це рівняння вперше було отримано в роботі [4], де було показано можливість виникнення нестійких станів. При цьому не бралися до уваги пов'язані з частотною дисперсією діелектричної проникності власні коливання, що існують у структурі без пучка.

У разі малої щільності пучка

$$\lambda_1 d_1 \ll 1; \quad \lambda_2 d_2 \ll 1$$

рівняння (3) перетворюється на вид:

$$\cos(\omega/v_0 - k)d = 1 - \omega_0^2 d^2 / (2v_0^2 \epsilon_{zz}), \quad (4)$$

де

$$\epsilon_{zz}(\omega) = d\epsilon_1\epsilon_2 / (d_1\epsilon_2 + d_2\epsilon_1) -$$

компонента тензора діелектричної проникності дрібнодисперсного середовища, а

$$\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_0 / m} -$$

плазмова частота електронів пучка.

У разі слабкої просторової дисперсії:

$$\omega d/v_0 \ll 1; \quad kd \ll 1$$

отримаємо:

$$(\omega/v_0 - k)^2 = \omega_0^2 / (v_0^2 \varepsilon_{zz}). \quad (5)$$

Закон дисперсії коливань має той самий вид, що і в однорідному середовищі, діелектрична проникність якого дорівнює $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. У наближенні малої щільності пучка вважаючи отримаємо:

$$\Delta\omega^2 = \omega_0^2 / \varepsilon_{zz}(\omega - kv_0); \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (6)$$

У цьому випадку виникають коливання з частотою, що визначається часом прольоту τ частинкою просторового періоду структури $\tau = d/v_0$. Ціле число l дорівнює відношенню часу прольоту до періоду коливань

Інкремент нестійкості γ дорівнює

$$\gamma = \text{Im} \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt[3]{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1 / (2\varepsilon_{01} d)}, \quad (7)$$

де

$$\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{01}}}.$$

Якщо $\omega = kv_0$, то ми маємо нестійкість в умовах черенківського резонансу з інкрементом, який у $\sqrt[3]{d_1/d_2}$ разів менше ніж у однорідній плазмі. У разі $\omega_p = \frac{2\pi v_0}{d} l$ нестійкість пов'язана з черенківським параметричним випромінюванням зарядженої частки.

Таким чином знаючи величину інкременту нестійкості ми можемо оцінювати таку характеристику оборотних відмов як величину енергії випромінювання власних коливань шаруватої структури в залежності від параметрів наведеного зовнішнім ЕМІ струму (концентрації носіїв, їх дрейфової швидкості та розмірів структури).

3. Розв'язання задачі. Потужність випромінювання $\Delta P_{\text{випр}}$ власних коливань напівпровідникової прилади за умов впливу зовнішнього поля (наявності наведеного струму) можна визначити як втрати енергії поступального руху потоку частинок (кінетичної енергії) за час проходження потоком частинок області локалізації поля хвилі

$$\Delta P_{\text{випр}} = \Delta W_{\text{кін}} / \Delta t_{\text{вз}}, \quad (8)$$

де

$$\Delta W_{\text{кін}} = \left(mv^2/2 \right) \cdot n_{ob} V;$$

$mv^2/2$ - кінетична енергія частки пучка, наведеного зовнішнім імпульсом; n_{ob}, V - відповідно концентрація та дрейфова швидкість електронів пучка, V - об'єм, який займає наведений струм (об'єм напівпровідникової структури).

У режимі пучкової нестійкості дрейфова швидкість

$$v \approx v_0 \exp(+\gamma t),$$

тобто час ефективної взаємодії хвиль та частинок $\Delta t_{\text{вз}}^{(5)} = 1/\gamma$, тому

$$\Delta P_{\text{ізл}} \approx mv_0 \gamma (n_{ob} V). \quad (9)$$

Таким чином, енергія випромінювання $\Delta W_{\text{ізл}}$ за час дії імпульсу напруги $\Delta t_{\text{імн}}$ визначається виразом

$$\Delta W_{\text{ізл}} = P_{\text{ізл}} \Delta t_{\text{імн}} \approx 2\gamma P_{\text{ізл}} \Delta t_{\text{імн}}. \quad (10)$$

Скориставшись співвідношенням (10) наведемо кількісні оцінки для втрат енергії наведених струмів на порушення власних коливань для шаруватих структур.

Параметри імпульсного електромагнітного випромінювання: амплітуда напруженості імпульсного електричного поля $E_0 = 15 \text{ кВ/м}$, тривалість імпульсу $\Delta t_{\text{імн}} \approx 500 \text{ нс}$. Величина енергії випромінювання власних коливань твердотільних шаруватих структур - $\Delta W_{\text{ізл}}$ при цьому складає $\approx (10^{-7} - 10^{-8}) \text{ Дж}$, тобто при чутливості сучасних приймачів НВЧ випромінювання [7] (10^{-10} Дж) цілком виявлена і є причиною оборотних відмов.

Висновки

Приведені гранично допустимі експлуатаційні параметри вітчизняних напівпровідникових приладів, що визначають їх електромагнітну стійкість і певні механізми виникнення незворотних відмов напівпровідникових комплектуючих апаратів зв'язку, обумовленого впливу токів і напруг, наведених зовнішнім випромінюванням, на працездатність апаратури зв'язку.

Запропоновано модель виникнення оборотних відмов напівпровідникових приладів, обумовлених взаємодією наведених зовнішнім ЕМІ струмів з електростатичними коливаннями напівпровідникової шаруватої структури. Модель базується на реалізації резонансної (черенківської) взаємодії рухомих зарядів і електромагнітних коливань в умовах, коли збігаються фазова швидкість хвилі і швидкість зарядженої частинки.

Отримано розрахункові співвідношення для визначення енергії випромінювання (критеріїв оборотних відмов), що пов'язують величину інкременту нестійкостей з величиною наведених струмів та параметрами шаруватих структур: концентрацією вільних носіїв, діелектричною проникністю, розмірами структури.

Наведені кількісні оцінки інкременту нестійкостей показують, що величина енергії випромінювання лежить у межах чутливості сучасних приймачів випромінювання субміліметрового діапазону цілком виявлена і є причиною оборотних відмов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білецький Н.Н., Світличний В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Електромагнітні явища НВЧ – діапазону в неоднорідних напівпровідникових структурах. – Київ.: Наукова думка. – 1991. – 216 с.
2. Зі С. Фізика напівпровідникових приладів. – М.: Мир. – 1984. – 456 с.
3. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Електромагнітні впливи на споруди зв'язку. – М.: Радіо та зв'язок. – 1979. – 225 с.
4. Стил М., Вюраль Б. Взаємодія хвиль у плазмі твердого тіла. – М.; Атоміздат – 1973. – 312 с.
5. Мирова Л.О., Чепиженко А.З. Забезпечення стійкості апаратури зв'язку до іонізуючих електромагнітних випромінювань. – М.: Радіо та зв'язок, 1988, 235 с.
6. Кравченко В.І., Яковенко В.М., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Вплив стороннього електромагнітного випромінювання на хвильоводні характеристики напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів // Вісник НТУ"ХПИ" – 2009. - № 11. – С.62 – 69.
7. Кравченко В.І., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Порушення електромагнітних коливань у 2-D електронних структурах струмами, наведеними зовнішнім випромінюванням // Вісник НТУ"ХПИ" – 2012. - № 21. – С.154 – 161.
8. Кравченко В.І., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Генерація електромагнітних коливань напівпровідникової структури в умовах стороннього електромагнітного впливу // Вісник НТУ"ХПИ" – 2012. - № 21. – С.161–169.
9. Кравченко В.І., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Вплив потоку заряджених частинок, наведеного зовнішнім електромагнітним випромінюванням на хвильоводні характеристики напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів // Вісник НТУ"ХПИ" – 2013. - № 27. – С.83–89.
10. Кравченко В.І., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Згасання поверхневих коливань напівпровідникових структур електрорадіовиробів в умовах впливу стороннього електромагнітного випромінювання // Вісник НТУ"ХПИ" – 2013. - № 27. – С.96–103.
11. Кравченко В.І., Яковенко І.В., Лосев Ф.В. Кінетичні механізми взаємодії поверхневих коливань з електронами провідності напівпровідникових структур за умов впливу стороннього електромагнітного випромінювання // Вісник НТУ"ХПИ" – 2013. - № 27. – С.103–111.

Received (Надійшла) 12.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.05.2022

**Mechanisms of influence of external electromagnetic radiation
on the performance of communication equipment**

Aleksandr Serkov, Vitalii Breslavets, Juliya Breslavets, Igor Yakovenko

Abstract. The **subject** matter is the processes of analysis and mechanisms for the occurrence of reversible and irreversible failures of semiconductor components of communication equipment, due to the influence of currents and voltages induced by external electromagnetic radiation on the performance of electrical and radio products. The **aim** is a model for the occurrence of reversible failures of semiconductor components of electrical and radio products, due to the interaction of induced currents with electrostatic oscillations of a semiconductor superlattice. **The methods used are:** determination of the spectrum of natural oscillations of the system: currents induced by electromagnetic radiation - natural oscillations of the components of the radio product by the method of the theory of small perturbations. **The following results are obtained:** Calculation relations are obtained that relate the magnitude of the instabilities increment (reversible failure criterion) with the magnitude of the induced currents and the parameters of layered structures: the concentration of free carriers, the permittivity, and the dimensions of the structure. The parameters of a third-party pulsed electromagnetic field, induced currents and operating characteristics of semiconductor devices are determined within which the regime of amplification of natural oscillations of a semiconductor structure is observed. The mechanisms of occurrence of reversible failures of products of semiconductor components of radio products under the influence of third-party pulsed electromagnetic fields are determined. It has been established that the presence of a current induced by external radiation leads to the establishment of a mode of amplification of natural oscillations of semiconductor components of a radio product (reversible failures). **Conclusion.** A comparative analysis of the calculated data obtained in the work can be used in the manufacture of radio devices operating in the millimeter and submillimeter range (amplifiers, generators and frequency converters). Estimates of amplification (generation) modes of oscillations of semiconductor devices, distorting their performance depending on the parameters of external electromagnetic influence, makes it possible to determine the possibilities of electromagnetic compatibility of microwave communication equipment.

Keywords: communication equipment. induced current, electromagnetic radiation, semiconductor components, surface vibrations, oscillation instability.