

PHYSICAL SENSORS

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.382

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ЗАЗОРА МЕЖДУ МАГНИТОПЛАНом И ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Ю. Н. Лаврич, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины
ул. Писаржевского, 5, г. Днепропетровск, 49005, Украина,
Тел. 38-056-3702182, 050-9055195.

E-mail: lavrich@westa-inter.com, svp@westa-inter.com, plm@westa-inter.com

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ЗАЗОРА МЕЖДУ МАГНИТОПЛАНом И ПУТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

Ю. Н. Лаврич, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский

Аннотация. С использованием закономерностей структурирования электромагнитных полей в рассогласованных волноведущих структурах, особенностей построения высокостабильных СВЧ генераторов с использованием полупроводниковых генераторных структур, проявляющих эффект Ганна, и с учетом специфического влияния СВЧ поля на развитие доменной неустойчивости в указанных полупроводниковых структурах построено устройство, позволяющее качественно отслеживать девиации зазора между транспортным средством и путевой структурой.

Ключевые слова: датчик зазора, микроволновый генератор, резонатор

ТВЕРДОТІЛЬНИЙ НВЧ ДАТЧИК ЗАЗОРУ МІЖ МАГНІТОПЛАНом І ШЛЯХОВОЮ СТРУКТУРОЮ

Ю. М. Лаврич, С. В. Плаксін, Л. М. Погоріла, І. І. Соколовський

Анотація. З використанням закономірностей структуризації електромагнітних полів у розузгоджених хвилевідних структурах, особливостей побудови високостабільних НВЧ генераторів з використанням напівпровідникових генераторних структур, які проявляють ефект Ганна, і з урахуванням специфічного впливу НВЧ поля на розвиток доменної нестійкості

у вказаних напівпровідникових структурах побудовано пристрій, який дозволяє якісно відстежувати девіації зазору між транспортним засобом і шляховою структурою.

Ключові слова: датчик зазору, мікрохвильовий генератор, резонатор

SOLID STATE MICROWAVE GAP SENSOR BETWEEN MAGNETOPLAN AND GUIDEWAY

Yu. N. Lavrich, S. V. Plaksin, L. M. Pogorelaya, I. I. Sokolovskiy

Abstract. The gap sensor allowing the registration on quality level of gap deviations between a transport vehicle and way structure with the use of the electromagnetic fields structurization regularities in unbalanced waveguide structures, construction features of the high-stable microwave generators on the base of semiconductor generator structures with the Gunn effect, and taking into account specific influence of the microwave field on domain instability development in this semiconductor structures, is built.

Keywords: gap sensor, microwave generator, resonator

Развитие высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе в части повышения скорости движения сдерживается отсутствием надежной и технологически завершенной информационно-управляющей системы [1]. В силу специфики условий, в которых должна функционировать указанная система с набором первичных датчиков – датчика линейного перемещения транспортного средства вдоль путевой структуры (представляющей собой большеразмерный сплошной полированный, в том числе и в местах стыка, алюминиевый лист с коэффициентом отражения электромагнитных излучений в СВЧ диапазоне не хуже 0,96), датчиков вертикальных и горизонтальных смещений транспортного средства относительно центральной (осевой) линии путевой структуры. Последние должны быть безынерционными, энергопрочными, термо- и помехоустойчивыми, обеспечивать нормальное функционирование при паразитных изменениях питающего напряжения, при этом помехоустойчивость важна, прежде всего, в том смысле, чтобы частота информационных сигналов соответствующим образом сформированной информационно-управляющей системы была значительно удалена от частоты питающей сети тяговой системы магнитолевитирующего транспортного средства.

Предшествующий опыт проектирования отдельных узлов и блоков радиоволновой системы управления магнитолевитирующих транспортных средств [2-4] показал, что в наибольшей мере указанным требованиям можно удовлетворить, используя в качестве носителей информационных сигналов электромагнитные волны СВЧ диапазона, источником которых являются объемные (без *p-n* перехода) полупроводниковые структуры с горячими электронами, проявляющие эффект Ганна, частота генерации которых определяется продольным размером (длиной) активной области и дрейфовой скоростью доменов сильного электрического поля, и ставшие универсальным прибором радиоэлектроники [5-6].

Настоящая работа представляет собой детальное рассмотрение одного из узлов информационно-управляющей системы – датчика зазора между транспортным средством – магнитопланом и путевой структурой, который позволяет при обработке модельных образцов магнитолевитационной системы качественно определить устойчивость транспортного средства в вертикальном направлении при различных скоростях движения.

В основу построения датчика положена мостовая схема контроля малых перемещений с использованием специально сконструиро-

ванного СВЧ генератора с двумя синфазными выходами, активными элементами которого являются диоды Ганна со специально подобранными параметрами, обеспечивающими при их совместной работе в общей электродинамической системе низкую модуляционную чувствительность – высокую стабильность частоты при паразитных колебаниях питающей сети. Выполнение автоколебательной системы, содержащей высокочастотный опорный резонатор, из термостабильного материала (инвара) позволяет достичь высокой кратковременной стабильности частоты генерации при изменениях температуры окружающей среды. Выбор параметров диодов Ганна осуществлен на основе детального рассмотрения механизма работы диодов Ганна с учетом специфического влияния СВЧ поля на развитие доменной неустойчивости, собственно и обеспечивающей генерационные способности диодов этого класса. По существу – генераторный СВЧ модуль является основным узлом разработанного датчика, конструирование которого с учетом вышеперечисленных признаков и позволяет обеспечить регистрацию достаточно малых отклонений транспортного средства (порядка 10-30 мм) в зазоре, для электродинамической левитации равном 120-150 мм [7].

На рис. 1. приведена структурная схема датчика, на рис. 2 – конструкция (эскиз) двухвходового генераторного модуля, на рис. 3 – его общий вид, где 1 – генератор, 2, 3 – волноводные секции, 4, 5 – емкостные зонды, 6, 7 – волноводные изгибы, 8, 9 – направленные излучатели, 10, 11 – амплитудные детекторы, 12, 13 – линейные усилители, 14 – суммирующий усилитель, 15 – индикатор, 16 – дифференциальный усилитель, 17 – путевая структура, 18, 19 – диоды Ганна, 20, 21 – коаксиальные резонаторы, 22, 23 – перестраиваемые короткозамыкающие поршни, 24 – механизм перестройки, 25, 26 – разъемы для подачи на диоды Ганна напряжения питания.

Двухвходовый генераторный модуль, **рис. 2**, содержит диоды Ганна 18 и 19, установленные в коаксиальных резонаторах 20 и 21, перестраиваемых короткозамыкающими поршнями 22 и 23 и стабилизирующим цилиндрическим резонатором 30. Геометрические размеры цилиндрического резонатора 30

и размеры отверстий связи (типа «серпик») 28, 29 были выбраны из условия получения высокой нагруженной добротности резонатора, возбуждаемого на волне E_{011} . Высокая стабильность частоты СВЧ генератора в интервале температур окружающей среды достигается за счет изготовления резонатора из инвара (коэффициент теплового расширения менее $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$). Диоды Ганна монтировались в коаксиальных резонаторах 20 и 21, образованных соответственно центральными проводниками 33, 34, наружными стенками 35, 36 и поршнями 22, 23 таким образом, чтобы анодные («горячие») выводы были обращены к массиву цилиндрического резонатора.

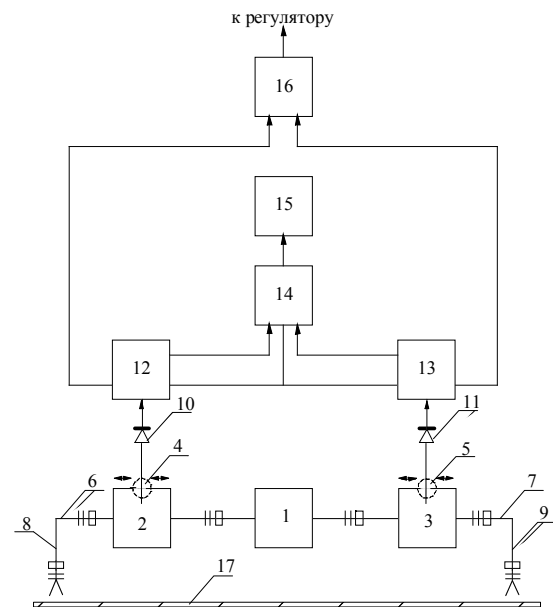


Рис. 1. Структурная схема датчика зазора.

Коаксиальные резонаторы 20 и 21 подключались к узким стенкам отрезка прямоугольного волновода 27, к широкой стенке которого был присоединен цилиндрический резонатор 30, перестраиваемый по частоте с помощью поршня 31 и механизма перемещения 32 (**рис.3**). Электромагнитная связь прямоугольного волновода 27 (сечением $28,5 \times 12,6 \text{ мм}^2$) и цилиндрического резонатора 30 с коаксиальными резонаторами 20 и 21 осуществлялась через отверстия связи 28 и 29.

При юстировке датчика передвижением емкостных зондов 4 и 5 вдоль волноводных секций добиваются размещения зондов в пуч-

ностях стоячей волны при неизменном расстоянии между каждым из излучателей и плоскостью полотна путевой структуры 17. Поскольку ось цилиндрического стабилизирующего резонатора равноудалена от выходов прямоугольного волновода генератора, а отверстия связи 28 и 29 выполнены симметрично относительно оси резонатора, то при равных продольных размерах волноводных секций с продольными щелями, при идентичных волноводных изгибах и идентичных излучателях в исходном (стационарном) состоянии напряжение на зондах в обоих плечах одинаково.

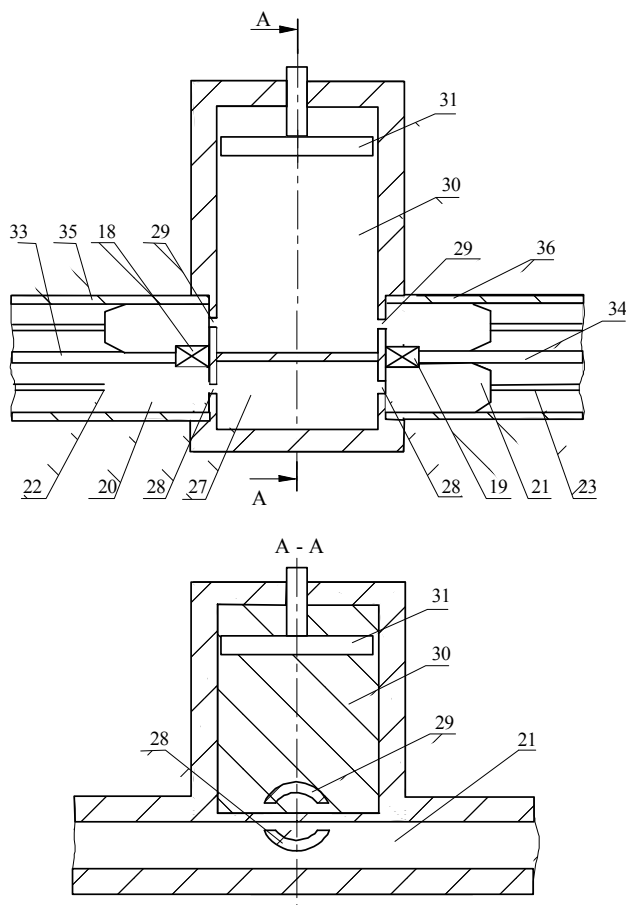


Рис. 2. Конструкция двухвходовой СВЧ генераторной камеры.

В волноводных секциях 2, 3 с емкостным зондом гальваническая связь с детекторными диодами обеспечивалась с использованием шайбовых резисторов, а экранировка зондов от внешних полей – с использованием втулок из прессованного порошкового железа (на рис. 1 обведено пунктирным кружком). Использование линейных усилителей 12, 13 с функцией нормирования позволяло устраи-

вать несоответствие между электрической неравномерностью связи зонда и механической неравномерностью глубины его погружения, а также влияние неоднородностей, обусловленных изменениями геометрических размеров отрезка волновода и волнового сопротивления на участке щели.

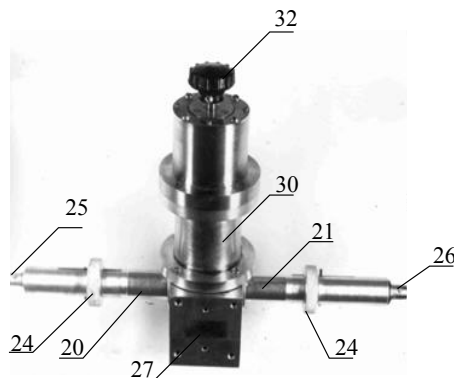


Рис. 3. Общий вид двухвходового генераторного модуля.

При подаче напряжения на диоды Ганна 18, 19, запитываемые от общего источника питания, одна из составляющих спектра СВЧ излучения, образующегося во время переходного процесса, захватывается цилиндрическим резонатором 30, при этом частота генерации СВЧ генератора и ее стабильность в установившемся режиме определяется резонансной частотой и добротностью цилиндрического резонатора. Собственные частоты коаксиальных резонаторов равны пролетным частотам установленных в них диодов Ганна. Пролетные частоты диодов Ганна не равны друг другу и резонансной частоте цилиндрического резонатора, сигнал которого является синхронизирующим для диодов Ганна в установившемся режиме. За счет обмена СВЧ энергией между коаксиальными резонаторами с установленными в них диодами Ганна частота генерации и стабильность частоты определяется добротностью и собственной частотой стабилизирующего резонатора. Перестройка частоты генерации осуществляется перемещением короткозамыкающего поршня стабилизирующего резонатора. Максимальное значение выходной мощности осуществляется при минимальной связи стабилизирующего резонатора с коаксиальными резонаторами и при этом

увеличивается влияние коаксиальных резонаторов и режимов работы первого и второго диодов Ганна на частоту генерации.

Нетрудно показать, что если добротность опорного резонатора Q_o и коаксиальных резонаторов Q_1, Q_2 связаны соотношением $Q_1, Q_2 < Q_o$, то изменение частоты генерации выходного сигнала генераторного модуля при изменении питающего напряжения U_n определяется выражением

$$\frac{1}{f_0} \frac{\delta f_0}{\delta U_n} \approx \frac{P_1 Q_1 + P_2 Q_2}{P_0 Q_0} \left[\frac{1}{f_1} \frac{\delta f_1}{\delta U_n} + \frac{1}{f_2} \frac{\delta f_2}{\delta U_n} \right] \cong \frac{1}{k} (D_1 + D_2) \quad (1)$$

где k – коэффициент стабилизации, f_1, f_2 – частоты генерации первого и второго диодов; P_1, P_2, P_0 – мощности потерь коаксиальных и опорного резонаторов соответственно; $\frac{\delta f_1}{\delta U_n}$, $\frac{\delta f_2}{\delta U_n}$ – девиации частоты каждого из диодов

Ганна относительно частоты опорного резонатора; D_1 и D_2 – относительные девиации частот генерации первого и второго диодов, f_0 – частота генерации, определяемая частотой опорного резонатора и равная 8.2 ГГц – на данной частоте в прямоугольном волноводе сечением $28,5 \times 12,6$ мм² основной вид волны H_{10} является достаточно устойчивым.

Таким образом, стабилизацию генерации можно реализовать, обеспечив взаимную компенсацию уходов парциальных частот первого и второго диодов (поз. 18 и 19) в соответствующих резонаторах, то есть, обеспечив условие $D_1 = -D_2$.

Так как каждый из коаксиальных резонаторов 20, 21 настроен на пролетную частоту установленного в нем диода Ганна f_1 или f_2 , то по отношению к установившейся частоте генерации f_0 первый диод с соотношением частот $f_1 < f_0$ работает в режиме задержки доменов, а второй диод с соотношением частот $f_2 > f_0$ – в режиме подавления доменов. Среднее за период значение динамической емкости диодов для указанных режимов определяется в соответствии с выражениями (2, 3) [6]:

$$\overline{C_1} = \frac{A}{E(k, \varphi) \sqrt{U_1' + U_n' - U_{min}'}} \quad , \quad (2)$$

$$\overline{C_2} = \frac{A}{E(k', \varphi) \cdot \sqrt{2U_1' - E(k', \psi) \cdot \frac{U_1' - U_n' + U_{min}'}{2\sqrt{U_1'}}}} \quad , \quad (3)$$

где $U_n' = \frac{U_n}{U_{nop}}$ – приведенное к пороговому

U_{nop} напряжению питания, подводимое к диодам, U_1' – высокочастотное напряжение, U_{min}'

– напряжение на диоде вне домена, $E(k, \varphi)$, $E(k', \varphi)$ – эллиптические интегралы 1 и 2 рода, соответственно (интегралы Лежандра),

$$A = \frac{\pi S}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{e \varepsilon \varepsilon_0 N}{U_{nop}}}, \quad k = \sqrt{\frac{2U_1'}{U_n' + U_{min}' + U_1'}}$$

$$k' = \sqrt{\frac{U_n' - U_{min}' + U_1'}{2U_1'}} \quad , \quad S - \text{площадь попереч-$$

ного сечения диода, N – концентрация электронов в материале диода, e – заряд электрона, ε_0 , ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость и относительная диэлектрическая проницаемость материала соответственно,

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos\left(-\frac{U_n' - 1}{U_1'}\right), \quad \psi = \arccos(k \sin \varphi).$$

Это означает, что при одинаковых значениях напряжения на диодах Ганна вне домена U_{min}' и примерно одинаковых значениях высокочастотного напряжения U_1' , увеличение U_n' (при паразитных уходах напряжения питания) приводит к увеличению $\overline{C_1}$ ($U_1' \leq U_n' - U_{min}'$ – режим задержанного домена) и, соответственно, к уменьшению частоты, и к уменьшению $\overline{C_2}$ ($U_1' \geq U_n' - U_{min}'$ – режим подавляемого домена) и, соответственно, к увеличению частоты. Таким образом, девиации частоты генерации диодов – коэффициенты D_1, D_2 в (1) имеют разные знаки, что предопределяет возможность поддержания постоянства частоты при случайных изменениях питающего напряжения.

При этом для практических приложений следует численно определить – как должны численно соотноситься пролетные частоты диодов и частота опорного резонатора между

собой, чтобы уходы частоты были равны и противоположны по знаку.

Расчет усредненных за период значений емкости диодов различной длины в интервале 9,5...46 мкм, проведенный с использованием следующих параметров: концентрация электронов $N=10^{15} \text{ см}^{-3}$ (типичное значение для диодов Ганна сантиметрового диапазона длин волн), заряд электрона $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $\varepsilon=12,6$, значение порогового поля $E_{\text{пор}}=3,25 \text{ кВ/см}$ (стандартное значение), поперечное сечение активной области $S_1=S_2=6,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ (типичный размер для сантиметрового диапазона), показал, что равное и противоположное изменение емкости диодов в (2) – (3) при изменении питающего напряжения достигается при длине активной области первого диода $l_1=15,6 \text{ мкм}$ и второго диода $l_2=9,9 \text{ мкм}$, для которых значения порогового напряжения равны 5 В и 3 В соответственно. Экспериментально соответствующим выбором отверстий связи 28 и 29 на рис. 2 удается обеспечить условие генерации диодов Ганна с указанными параметрами в пределах полосы удержания стабилизирующего резонатора, что соответствует диапазону значений частот генерации $f_1=(0,7-0,9)f_0$ для первого диода и $f_2=(1,15-1,3)f_0$ для второго диода. Диоды с указанными значениями частот f_1 и f_2 выпускаются серийно, причем 40...50 % диодов Ганна из партии 100 шт. диодов 3А722Б и типа 3А723Б могут удовлетворить ранее приведенным частотным соотношениям. Соответствующий отбор осуществляется с помощью простой установки, включающей автоколебательную систему с низкой нагруженной добротностью.

Реализация контроля устойчивости движения сводится к тому, что один датчик зазора (рис. 1) устанавливается в передней части транспортного средства, другой – в задней его части с тем, чтобы отследить меру отклонения от идеального горизонтального расположения в плоскости, совпадающей с плоскостью путевой структуры 17 при юстировке, относительно продольной оси и отклонения передней и задней частей. В режиме левитации при движении вдоль полотна путевой структуры

расстояние между плоскостью днища транспортного средства и плоскостью путевой структуры может изменяться, что приводит к изменению местоположения экстремальных значений поля вдоль структуры. Пучности электромагнитной волны будут смещаться относительно зондов 4, 5 и, соответственно, изменится напряженность поля на зондах, что позволит использовать эти изменения в качестве информационного сигнала для системы управления положением и при необходимости с помощью системы регуляции осуществлять соответствующую коррекцию левитирующей системы.

Известно, что электродинамический подвес в правильно спроектированном транспортном средстве обладает свойством самостабилизации [7], при этом индикаторное устройство 15 выдает информацию о мере постоянства выбранного (установленного первоначально, на стадии юстировки) усредненного расстояния между транспортным средством и полотном путевой структуры 17. Волноводные изгибы 6 и 7 как волноводные переходы с изменяющимся направлением осей волноводов в 90° и хорошим внутренним согласованием проектировались по известным методикам [8]. Конструктивно обе сборки устанавливаются на транспортном средстве таким образом, чтобы плоскости раскрыва направленных излучателей 8 и 9 совпадали с плоскостью днища транспортного средства.

Разработанный датчик зазора имеет значительный потенциал развития: он положен в основу быстродействующей информационно-управляющей системы, использованной при проведении испытаний экспериментального образца транспортного средства на электродинамическом подвесе подвесе, разработанного Институтом транспортных систем и технологий НАН Украины [7].

Список использованной литературы

- [1]. Antonov Yu.F. Zaicev Magnitolevitacionaja transportnaja tehnologiya. M. Fizmatlit, 476 s. (2014).
- [2]. Pkaksin S.V., Sokolovskiy I.I., Pogorelaya L.M. The synthesis of a fast-acting information-control system on the base of hot-electron devices // Telecommunications and Radio Engineering, V.

65, № 8, P. 741-756 (2006).

[3] Dzenzersky V.A., Plaksin S.V., Sokolovsky I.I. Radiovolnovie metodi kontrolya i upravleniya dvizheniyem magnitolevitiruyuschih transportnih sredstv // Radioelektronika. Informatica. Upravleniye, № 1, S. 108 -114 (2002).

[4]. Dzenzersky V.A., Sokolovsky I.I., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M. Radiowave informative-control system for magnitolevitative vehicles with electrodynamic suspension / Proceedings of 17th International Conference on MAGnetically LEVitated Systems and Linear Drives “MAG-LEV’2002”, Swiss Federal Institute of technology, Lausanne (2002).

[5]. Sokolovskiy I.I., Goncharov V.V., Kostilov S.A., Chelyadin A.V. Poluprovodniki s ob’yomnoy otricatelnoy provodimost’yu v SVCh

polyah, K.Naukova dumka, 144 s. (1987).

[6]. Plaksin S.V., Sokolovskiy I.I. Fizicheskiye osnovi postroeniya bistrodeistvuyuschih informacionno-upravlyayuschih system na baze poluprovodnikovih elementiv s goryachimi elektronami, Sevastopol. Veber, 320 s. (2006)

[7]. Dzenzerskiy V.A., Omelyanenko V.I., Vasil’yev S.V., Matin V.I., Sergeev S.A. Visokoskorostnoy magnitniy transport s elektrodinamicheskoy levitaciyey. K. Naukova dumka, 479 s. (2001).

[8]. G. Buduris, P. Shenev’e. Ceria sverhvisokih chastot: teoriya i primenenie M. Sov. Radio, 288 s. (1979).

Стаття надійшла до редакції 21.08. 2014 р.