

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ НА ОСНОВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ФОКУСИРОВКОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

### Введение

В [1 – 3] изложено состояние работ по системам беспроводной передачи энергии (БПЭ), теоретический анализ целесообразности и возможности создания систем БПЭ малой дальности к труднодоступным наземным объектам расположенным в горах, на островах морей и крупных озерах. Предложены варианты и принципы построения таких систем БПЭ. В них используются передающая подсистема БПЭ на основе многопозиционной системы излучателей (МСИ) с пространственно-фазово-частотной (ПФЧ) фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных сигналов и в качестве приемной подсистемы – ректенна. В [1, 2] приведены пространственно-временные и энергетические характеристики излучаемых передающей подсистемой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных сигналов. В работах [1, 3] обоснованы структура и особенности требований к параметрам сфокусированных пространственно-временных импульсов (ПВИ) передающей подсистемы и системы БПЭ в целом. Определены производительность этих систем БПЭ, зоны биологической безопасности для обслуживающего персонала и местного населения. Однако в указанных работах не были проведены статистический анализ и оценка влияния случайных и детерминированных отклонений заданных электрических параметров излучаемых сигналов, конструктивных параметров МСИ предложенных передающих подсистем БПЭ.

В составе предложенных передающих подсистем БПЭ на многопозиционной системе излучателей с ПФЧ фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных излучаемых сигналов в качестве излучателей МСИ используются радиолокационные станции (РЛС) с фазированными антенными решетками (ФАР) и когерентными импульсными излучаемыми сигналами. Для формирования передающей подсистемой БПЭ последовательностей сфокусированных ПВИ с требуемыми параметрами необходимо задать специальные законы распределения начальных фаз и частот излучаемых сигналов по излучателям МСИ [1 – 3]. Анализ предложенного метода формирования последовательностей коротких ПВИ при использовании одноступенчатого дискретного V-образного закона распределения несущих частот по излучателям МСИ в [1 – 3] проводился без учета возможных ошибок установки начальных фаз и несущих частот в передающих каналах. Однако при практическом осуществлении синфазного сложения полей от большого количества источников излучения за счет случайных неконтролируемых изменений параметров закона ПФЧ управления излучаемыми сигналами возможно существенное ухудшение характеристик системы БПЭ. Поэтому возникает необходимость исследования влияния различного рода отклонений от заданных значений параметров закона ПФЧ управления излучаемых сигналов в излучателях МСИ на формирование требуемых последовательностей ПВИ. При этом необходимо исследовать влияние ошибок в установке заданных значений начальной фазы, несущей частоты и дискретности ее установки на характеристики формируемых ПВИ. Кроме того, на уровень спектральной плотности потока мощности электромагнитного излучения (ЭМИ), создаваемого в точке фокусировки на ректенне приемной подсистемы БПЭ, могут оказывать негативное воздействие конструктивные параметры МСИ передающей подсистемы БПЭ, влияющие на точность осуществления фокусировки ЭМИ в заданной точке пространства. Таким основ-

ным конструктивным параметром для МСИ являются ошибки по точности установки координат фазовых центров отдельных источников излучения в МСИ.

Цель статьи – устранение этих пробелов, а именно – статистическая оценка требований по точности установки координат фазовых центров, значений начальных фаз, несущих частот и дискретности их установки по излучателям МСИ передающей подсистемы БПЭ.

### **Статистическая оценка требований по точности установки координат фазовых центров излучателей в многопозиционной системе излучателей передающей подсистемы беспроводной передачи энергии**

МСИ с нечетным числом излучателей, при расположении ее центрального излучателя в начале прямоугольной декартовой системы координат, создает в момент времени  $t$  в точке наблюдения с координатами  $x, y, z$  поле излучения с плотностью потока мощности, которое рассчитывается по выражению, имеющему вид [1, 2, 4]:

$$S(x, y, z, t) = \left| \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_{0n} \left( t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n} \right] \right\} \right|^2, \quad (1)$$

где  $P_n$  и  $G_n$  – излучаемая мощность и коэффициент усиления отдельного источника излучения в МСИ;  $R_n = [(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2]^{1/2}$  – расстояние до точки наблюдения от  $n$ -го излучателя;  $f_{0n}$  – начальная частота  $n$ -го излучателя в МСИ;  $\varphi_{0n}$  – начальная фаза  $n$ -го излучателя в МСИ;  $N$  – количество источников излучения в МСИ.

Из (1) видно, что качество фокусировки ПВИ зависит от степени обеспечения заданных координат фазовых центров источников излучения  $x_n, y_n, z_n$ . Однако при создании конкретной МСИ передающей подсистемы БПЭ малой дальности к труднодоступным наземным объектам возможны ошибки в обеспечении выбранных координат фазовых центров излучателей, и законы изменения мгновенных фаз не будут соответствовать требованию когерентного сложения сигналов излучателей в заданной точке фокусировки в пространстве (на антенне приемной подсистемы БПЭ). Поэтому процесс формирования последовательности сфокусированных ПВИ может быть нарушен. Для обоснования требований к точности расположения фазовых центров излучателей в плоских ФАР и МСИ проведем математическое моделирование поля излучения при использовании ПФЧ фокусировки одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных излучаемых сигналов при наличии указанных ошибок.

Влияние ошибок в расположении фазовых центров отдельных источников излучения при равномерном законе их распределения на математическое ожидание нормированной плотности потока мощности плоской ФАР можно оценить на основе (1) по выражению

$$\langle S_n(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\max}} \left| \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_{0n} \left( t - \frac{R_n^\Delta}{c} \right) + \varphi_{0n} \right] \right\} \right|^2 \right\rangle, \quad (2)$$

где  $S_{\max}$  – максимальное значение плотности потока мощности плоской МСИ.

Расстояние до точки наблюдения от каждого излучателя МСИ с учетом ошибок расположения фазовых центров

$$R_n^\Delta = \sqrt{(x - x_n^\Delta)^2 + (y - y_n^\Delta)^2 + (z - z_n^\Delta)^2}; \quad (3)$$

где  $x_n^\Delta = x_n + \Delta x \Psi_1$ ,  $y_n^\Delta = y_n + \Delta y \Psi_2$ ,  $z_n^\Delta = z_n + \Delta z \Psi_3$  – значения координат фазовых центров излучателей в МСИ с учетом ошибок;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  – максимальные значения ошибок расположения фазовых центров излучателей;  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  – равномерно распределенные в интервале  $[-1, 1]$  случайные числа.

Требуемые законы распределения начальных фаз, для осуществления когерентного сложения полей от источников излучения многопозиционной системы излучателей с ПФЧ

фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных излучаемых сигналов в выбранной точке фокусировки при отсутствии ошибок в расположении излучателей, имеют вид [1, 2, 4]:

$$\varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right), \quad (4)$$

где  $R_{Fn} = \sqrt{(x_F - x_n)^2 + (y_F - y_n)^2 + (z_F - z_n)^2}$  – расстояние между точкой фокусировки с координатами  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  и центром  $n$ -го источника излучения с координатами  $(x_n, y_n, z_n)$ , а распределение несущих частот по излучателям МСИ:

$$f_{0n} = f_0 + |n| \Delta F_n, \quad (5)$$

где  $n \in [-(N-1)/2; \dots 0; \dots (N-1)/2]$ ;  $f_0$  – несущая частота центрального источника излучения в МСИ.

Рассмотрим влияние ошибок расположения фазовых центров излучателей на характеристики поля излучения МСИ. С целью сопоставимости и наглядности оценки, для оценки энергетических и временных характеристик многопозиционной системы излучателей с фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных импульсов, проведем математическое моделирование на аналогичной МСИ, для которой проводилось в [1, 2] математическое моделирование. Эффективная база МСИ  $L_{эф}=1000$  м;  $\lambda=0,1$  м;  $N=33$  и  $P_n = 10$  кВт ( $P_{изл.} = P_n N = 330$  кВт). Шаг частоты между соседними источниками излучения составляет  $\Delta F = 6,25$  МГц и, соответственно, максимальный разнос несущих частот  $\Delta F_{max} = 100$  МГц, что позволяет формировать последовательность ПВИ длительностью  $\tau_{пви} = 10$  нс с периодом повторения  $T_{пви}=160$  нс. Система координат и положение излучателей в МСИ с фокусировкой ЭМИ в точке  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  приведены на рис. 1.

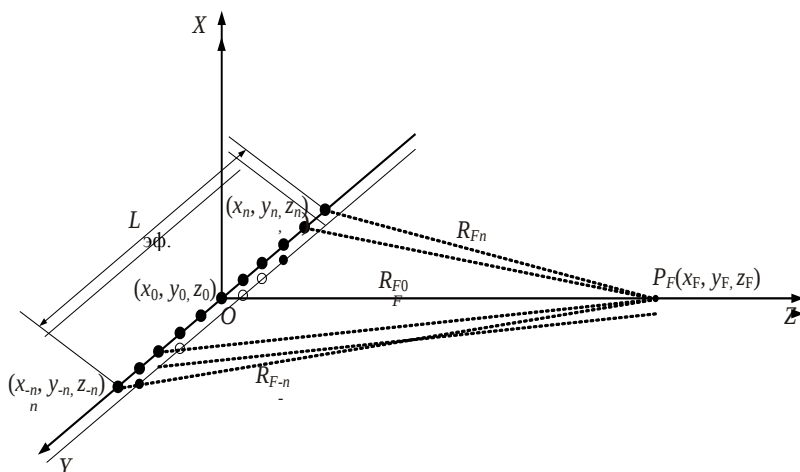


Рис. 1

Как было показано в [2], фокусировка ЭМИ в рассматриваемой малобазовой МСИ возможна уже на дальностях, превышающих в 2 – 4 раза размер эффективной базы  $L_{эф}$ . При этом структура сформированной последовательности ПВИ изменяется с увеличением дальности фокусировки [2, рис. 6 – 8]. Исходя из этого, рассмотрим влияние ошибок расположения фазовых центров излучателей на характеристики поля излучения МСИ с учетом дальности фокусировки. Проведем анализ влияния указанных нестабильностей на уровень пиковой мощности сфокусированной последовательности ПВИ. Проведем оценку максимальных значений ошибок расположения фазовых центров излучателей, при которых уровень мощности сфокусированных ПВИ изменяется не более чем на 10 %.

На рис. 2 приведены зависимости математического ожидания нормированной плотно-

сти потока мощности излучения МСИ от ошибок  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  соответственно, рассчитанные по выражению (2) и (3) при использовании ОСД V-образного закона распределения частот (см. (4), (5)) при изменении дальности до точки фокусировки от  $z_F = 4,0L_{эф}$  до  $z_F = 24,0L_{эф}$ .

Как видно из рис. 2, а, влияние ошибок расположения излучателей по оси ОХ на уровень  $\bar{S}_H$  более существенно сказывается при выборе точки фокусировки на малых дальностях от апертуры МСИ. При этом уменьшение значения  $\bar{S}_H$  не превышает 10 % на дальности  $z_F = 4,0L_{эф}$  при  $\Delta x = 1,5\lambda$ . С увеличением дальности до точки фокусировки влияние ошибок расположения излучателей по оси ОХ становится менее существенным, и на дальности  $z_F = 14,0L_{эф}$  уменьшение значения  $\bar{S}_H$  на 10 % происходит при  $\Delta x = 4,0\lambda$ . Выбираем как допустимое значение  $\Delta x \leq 1,5\lambda$ . Как видно из рис. 2, б, влияние ошибок расположения излучателей по оси ОУ на уровень  $\bar{S}_H$  менее существенно, чем влияние ошибок расположения излучателей по оси ОХ.

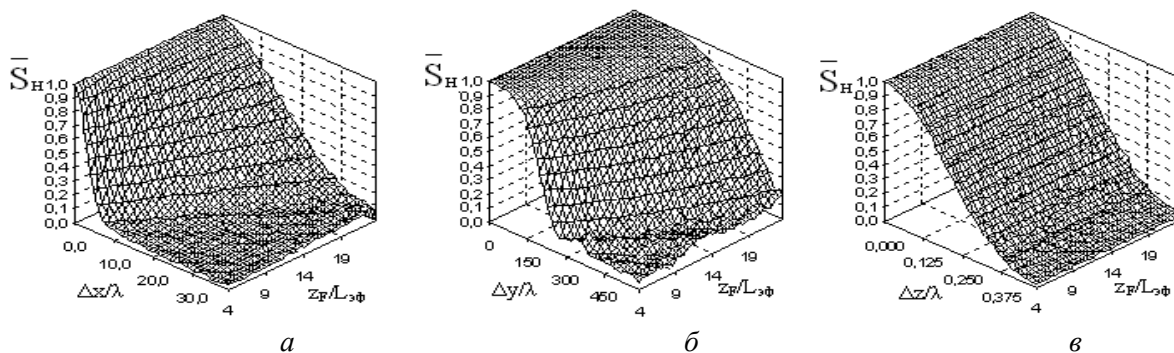


Рис.2

Анализ рис. 2, в показывает, что влияние ошибок расположения фазовых центров излучателей по оси ОZ не зависит от дальности до точки фокусировки. Однако, в отличие от предыдущих случаев, влияние ошибок по оси ОZ является существенным и требуется принятие специальных мер по их снижению [4]. Область допустимых значений  $\Delta z$ , в которой уменьшение значения  $\bar{S}_H$  не превышает 10 %, определяется из условия  $\Delta z \leq \lambda/6$ .

#### **Статистическая оценка требований по точности установки значений начальных фаз, несущих частот и их дискретности в многопозиционной системе излучателей передающей подсистемы беспроводной передачи энергии**

Статистические параметры законов ПФЧ управления фокусировкой ЭМИ (вид закона распределения ошибок, дисперсии и радиусы корреляции ошибок) являются при изучении статистики поля излучения исходными величинами. Однако из-за большого количества элементов в передающих каналах в предложенной в [1, 2] системы БПЭ, видов и источников нестабильностей достаточно сложно определить вид закона распределения ошибок параметров сигналов в каждом канале ФАР в МСИ. Учитывая конструктивную независимость передающих каналов и пренебрегая их взаимным влиянием, в дальнейшем будем предполагать, что ошибки установки параметров сигналов каналов ФАР в МСИ некоррелированы и равновероятны.

Рассмотрим влияние ошибок в установке заданных дискретностей несущей частоты и начальной фазы в каждом излучающем элементе на характеристики излучения МСИ. Расчет значений математического ожидания нормированной плотности потока мощности проведем на основе (1) по выражению

$$\langle S(x, y, z, t) \rangle = \left\langle \frac{1}{S_{\max}} \left| \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[ 2\pi f_{0n} \left( t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n} \right] \right\} \right|^2 \right\rangle. \quad (6)$$

При этом закон распределения начальных фаз определяемый по (4) с учетом ошибок имеет вид:

$$\varphi_{0n}^{\Delta} = -2\pi f_{0n} \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right) + \Delta\varphi\Psi_1, \quad (7)$$

где  $\Delta\varphi$  – максимальное значение ошибки установки начальной фазы в каждом источнике излучения;  $\Psi_1$  – случайная величина, равномерно распределенная в пределах интервала  $[-1,1]$ .

Одноступенчатый V-образный закон распределения несущих частот (см. (5)) с учетом ошибок можно записать в виде

$$f_{0n} = f_0 + |n|\Delta f + \Delta f\Psi_2, \quad (8)$$

где  $\Delta f$  – максимальное значение ошибки установки несущей частоты в каждом источнике излучения;  $\Psi_2$  – случайная величина, равномерно распределенная в пределах интервала  $[-1,1]$ .

Математическое моделирование поля излучателей в точках фокусировки ЭМИ проведем для МСИ с теми же параметрами и на тех же дальностях до точки фокусировки, что и в предыдущем разделе.

На рис. 3 приведена зависимость математического ожидания нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ от ошибок  $\Delta\varphi$  при изменении дальности до точки фокусировки от  $z_F = 4,0L_{\text{эф}}$  до  $z_F = 24,0L_{\text{эф}}$ . Как видно из рис. 3, влияние ошибок закона ПФ управления излучаемыми сигналами не зависит от дальности до точки фокусировки. Однако влияние ошибок закона ПФ управления является существенным и требуется принятие специальных мер по их уменьшению [4]. По результатам математического моделирования на рис. 3 видно, что область допустимых значений  $\Delta\varphi$ , при которой уменьшение значения  $S_H$  не превышает 10 % определяется из условия  $\Delta\varphi \leq \pi/3$ .

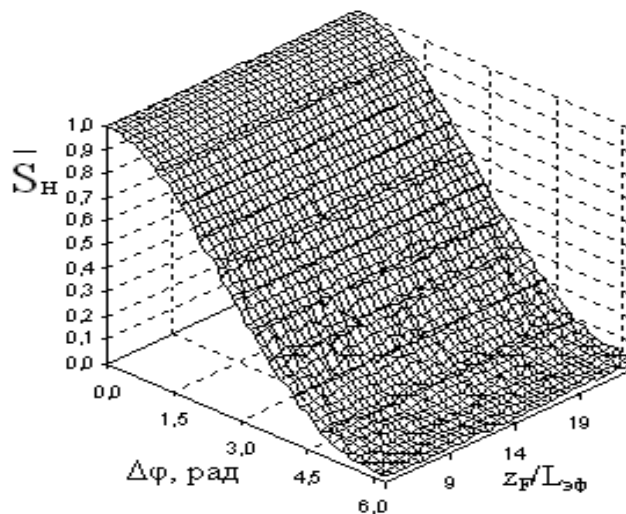


Рис. 3

На рис. 4 приведены зависимости математического ожидания нормированного значения плотности потока мощности излучения МСИ без ошибок в установке заданной дискретности несущих частот  $\Delta f=0$  (рис. 4, а) и с учетом максимального значения этой ошибки  $\Delta f=300$  кГц (рис. 4, б) для точки фокусировки  $z_F = 14,0L_{эф}$ .

Как видно из рис. 4 б, влияние ошибок установки несущих частот, нарастающее со временем, уменьшает длительность пачки ПВИ, что должно учитываться при осуществлении фокусировки ЭМИ на дальностях, сравнимых с  $L_{эф}$ .

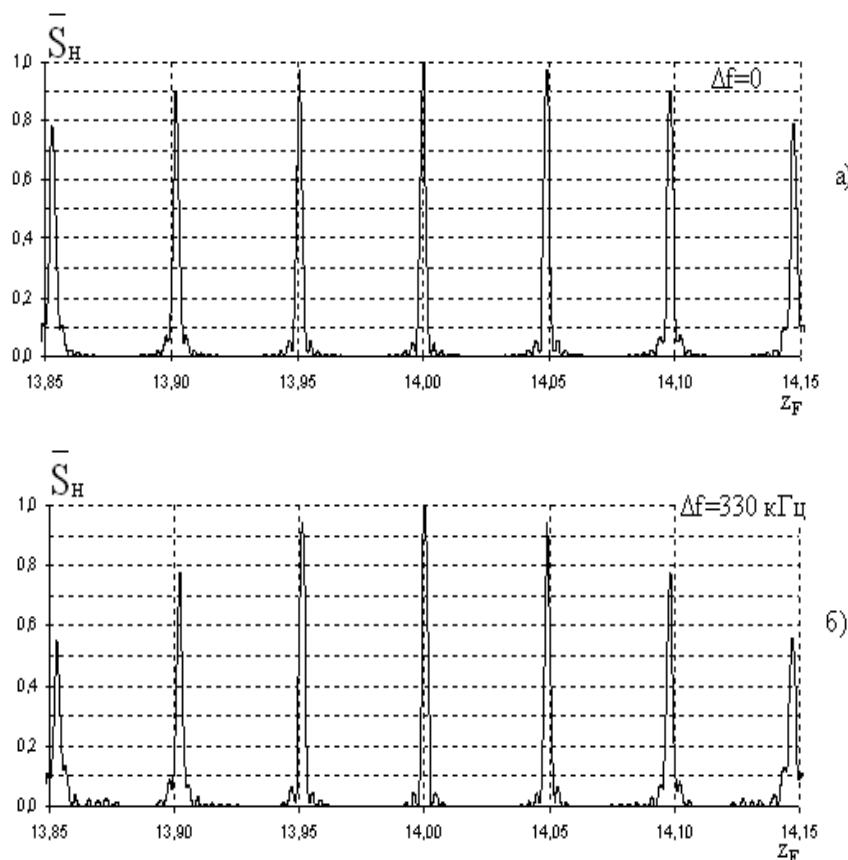


Рис. 4

С увеличением дальности до точки фокусировки, влияние ошибок установки несущих частот в передающих каналах МСИ, становится зависимым от длительности формируемой пачки ПВИ, т.к. с увеличением дальности до точки фокусировки, при ПФЧ фокусировке одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных импульсов, увеличивается длительность, формируемой в области точки фокусировки пачки сфокусированных ПВИ [2, рис 6 – 8].

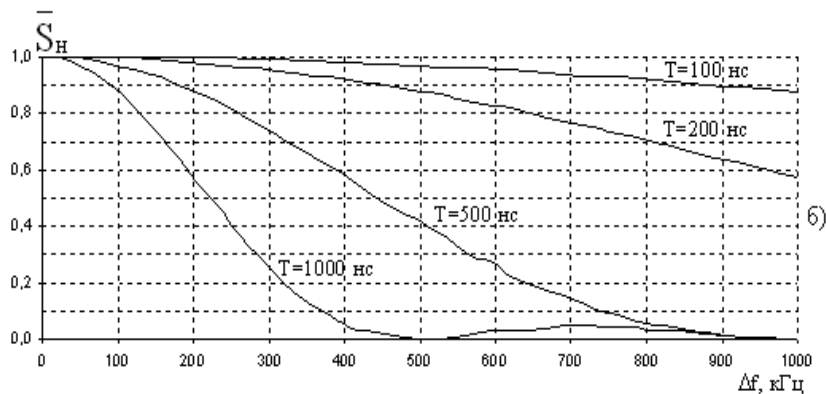


Рис. 5

На рис. 5 приведена зависимость нормированной спектральной плотности потока мощности излучения МСИ от значений абсолютной нестабильности частоты  $\Delta f$  и разных значений  $T$  – длительности пачки ПВИ. Результаты проведенных расчетов на рис. 5 показали, что снижение значения плотности потока мощности МСИ не более 10 % возможно при обеспечении допустимых ошибок значений установки несущей частоты излучателей и нестабильности частоты в передающих каналах из условия  $\Delta f T \leq 0,1$ .

### Заклучение

Таким образом, возможные отклонения от заданной дискретности установки несущих частот и точности установки начальных фаз излучаемых сигналов, координат фазовых центров МСИ передающих подсистем БПЭ к труднодоступным наземным объектам предложенных в [1 – 3], могут существенно повлиять на величину плотности потока мощности ЭМИ в заданной точке фокусировки (на ректенне приемной подсистемы БПЭ). Кроме того, рассмотренные в статье возможные электрические и конструктивные отклонения могут существенно повлиять на процессы формирования заданных параметров последовательностей ПВИ. Это в свою очередь существенно повлияет на величину передаваемой системой БПЭ мощности по постоянному току потребителю на объекте. По результатам математического моделирования, приведенных на рис. 2 – 5, обоснованы требования по обеспечению максимальных ошибок при которых плотность потока мощности сфокусированных ПВИ изменяются не более чем на 10 %, а именно: по расположению координат фазовых центров излучателей – из условия  $\Delta x \leq 1,5\lambda$ ,  $\Delta z \leq \lambda/6$ , по установке начальной фазы по излучателям МСИ – из условия  $\Delta \varphi \leq \pi/3$  и по точности установки несущей частоты и ее нестабильности – из условия  $\Delta f T \leq 0,1$ . Исходя из этого можно предъявить технические требования к конструктивным параметрам и элементной базе необходимых для разработки таких систем БПЭ. На основании изложенного можно заключить, что техническая реализация таких систем БПЭ при использовании современной цифровой элементной базы возможна, но с достаточно жесткими требованиями по обеспечению местоположения фазовых центров излучателей в МСИ по дальности до точки фокусировки на ректенне приемной подсистемы БПЭ (по нормали к апертуре МСИ).

**Список литературы** 1. Гомозов, А.В. Возможность реализации системы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на многопозиционной системе с фокусировкой излучения и ректенне / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии : сб. науч. тр. 4-го Междунар. радиоэлектрон. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 18-21 октября 2011 г. Ак-я прикл. радиоэл-ки, Харьк. нац. ун-т радиоэл-ки. – Т.І. Ч. 1. – Х., 2011. – С. 365-370. 2. Гомозов, А.В. Передающая подсистемы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч.1. / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В.Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 165. – С. 112-118. 3. Гомозов, А.В. Передающая подсистемы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч.2. / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В.Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 167. – С. 18-24. 4. Гомозов, А. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / А. Гомозов, В. Гомозов, Г. Ермаков, С. Титов. – Х. : КП «Городская типография», 2011. – 330 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.04.2011