

А.В. ГОМОЗОВ, канд. техн. наук, В.И. ГОМОЗОВ, д-р техн. наук,  
В.М.ШОКАЛО, д-р техн. наук, Д.В. ГРЕЦКИХ, канд. техн. наук, Ш.Ф.А. АЛЬ-САМАРАЙ

## ПЕРЕДАЮЩАЯ ПОДСИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ НА ОСНОВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ФОКУСИРОВКОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ. ЧАСТЬ 2

В первой части статьи изложено состояние работ по системам беспроводной передачи электроэнергии (БПЭ). Предложена система БПЭ малой дальности к труднодоступным объектам, расположенным в горах, на островах морей и крупных озерах, на основе многопозиционной системы (МСИ) излучения с фокусировкой одноступенчатых дискретных (ОСД) V-образных многочастотных сигналов (МЧ) и ректенны. Приведены пространственные временные и энергетические характеристики ОСД V-образных МЧ сигналов.

### Структура и особенности требований к параметрам сфокусированных пространственно-временных импульсов передающей подсистемы беспроводной передачи энергии

Специфика работы систем БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам на небольшие дальности обуславливает особенности требований к структуре и параметрам сфокусированных пространственно-временных импульсов (ПВИ).

К ним, в частности, относятся:

1. Необходимость непрерывной работы в течение больших интервалов времени при максимальной спектральной плотности потока мощности ПВИ передающей подсистемы.

2. Исключение возможного вывода из строя СВЧ входных и других радиоэлементов приемных ректенн последовательностями сфокусированных ПВИ собственной передающей подсистемы БПЭ.

Вывод из строя ректенны может вызываться деградацией радиоэлементов при длительном воздействии на них пачек ПВИ собственной передающей подсистемы с фокусировкой, имеющих большие спектральные плотности потока мощности. Эффект деградации связан с постоянной времени релаксации тепловых процессов (тепловой инерции)  $\tau_T$  в радиоэлементах. Он может возникнуть при суммарном времени воздействия на ректенну  $\tau_{\Sigma}$  всей пачки ПВИ за вычетом интервалов между ними, если длительность одиночного ПВИ  $\tau_B \leq \tau_K$  и период их следования  $T_B < \tau_T$ , где  $\tau_K$  – время срабатывания устройства защиты от перегрузок по СВЧ входу ректенны.

Величина постоянной времени релаксации тепловых процессов  $\tau_T$  для СВЧ радиоэлементов, например полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, составляет от 10 до 450 нс и более [1, 2]. Если период следования пачки ПВИ  $T_B < \tau_T$ , мощность на входе указанных типов радиоэлементов, приводящая к их деградации, определяется соотношением [1 – 3]:

$$P_{др} = K_{П} \tau_{\Sigma}^{-1/2} \cdot S_{p-n}, \quad (1)$$

где  $K_{П}$  – постоянная теплового повреждения для соответствующих типов радиоэлементов, которая имеет размерность  $[кВт/(мкс)^{1/2} \cdot см^{-2}]$ ;  $\tau_{\Sigma}$  – суммарное время воздействия периодическими ПВИ без учета интервалов между ними, приводящего к деградации СВЧ полупроводниковых радиоэлементов;  $S_{p-n}$  – площадь p-n перехода в  $см^2$ .

Мощность воздействующего ПВИ передающей подсистемы при известных одинаковых центральных частотах его спектра и полосы частот ректенны приемной подсистемы БПЭ, приводящая к деградации СВЧ полупроводниковых радиоэлементов ректенны, может быть рассчитана по соотношению для внутрисполосного функционального поражения [4]:

$$P_{\text{ФДР}}^{P,1} = K_{\text{П}} \tau_{\text{ВЭ}}^{-(1/2)} S_{p-n} K_{\text{СП}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{СП}}$  – коэффициент компенсации потерь за счет несовпадения ширины спектра воздействующих ПВИ и полосы частот ректенны БПЭ.

Усредненные значения  $K_{\text{П}}$  и  $S_{p-n}$  для основных типов полупроводниковых приборов, приведенные в [3, 5, 6], а также значения  $P_{\text{ФДР}}^{P,1}$  для случая внутриполосного воздействия ПВИ на радиоэлектронные элементы, если принять  $\tau_{\text{ВЭ}}=100$  мс при  $K_{\text{СП}}=10-15$  дБ, рассчитанные по формуле (2), представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип ПП прибора	$K_{\text{П}}, \text{кВт} / (\text{мкс})^{1/2} \cdot \text{см}^{-2}$	$S_{p-n}, \text{см}^2$	$\tau_{\text{ВЭ}}, \text{мс}$	$P_{\text{ФДР}}^{P,1}, \text{мВт}$	
				$K_{\text{СП}}=10 \text{ дБ}$	$K_{\text{СП}}=15 \text{ дБ}$
ППД и ППТ	0,1	$10^{-3}-0,05$	$10^2$	$3...2 \cdot 10^2$	$10...5 \cdot 10^2$
Диоды СВЧ	0,01	$10^{-3}-0,05$	$10^2$	0,3...20	1...50
ИС и БИС	0,1	$10^{-4}-0,02$	$10^2$	0,3...6	1...20

В табл.1 приняты аббревиатурные сокращения: ППД и ППТ – полупроводниковые диоды и транзисторы; ИС – интегральные схемы; БИС – большие интегральные схемы.

В [6] для расчета постоянной  $\tau_{\text{T}}$  приведено соотношение

$$\tau_{\text{T}} = (C_p \cdot \rho / k_{\text{T}}) (d^2 / \pi^2), \quad (3)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $k_{\text{T}}$  – удельная теплопроводность;  $d$  – толщина  $p-n$  перехода полупроводникового материала. Для приведенных в работах [6, 7] значений основных параметров полупроводниковых материалов, определяющих их тепловую инерцию, значения  $\tau_{\text{T}}$ , рассчитанные по выражению (3), представлены в табл. 2.

Таблица 2

ПП материал	$\rho, \text{г/см}^3$	$k_{\text{T}}, \text{Вт/м}^\circ\text{К}$	$C_p, \text{Дж/кг}^\circ\text{К}$	$\tau_{\text{T}}, \text{нс}$
Кремний	2,33	96,5	756	200
Германий	5,323	60,7	333	300
Арсенид галия	5,32	46,05	350	410

Приведенное в табл. 2 наибольшее значение  $\tau_{\text{T}}=410$  нс и указанный ранее интервал времени  $\tau_{\text{ВЭ}}=100$  мс можно принять в качестве исходных при выборе структуры последовательностей ПВИ передающей подсистемы БПЭ.

Для указанных выше условий в [3] показано, что структура пачек ПВИ должна состоять из двух частей, которые при необходимости длительного времени воздействия могут излучаться несколько раз подряд. Первая часть этой структуры пачек ПВИ, чтобы исключить вывод ими из строя ректенн, как минимум, с десятикратным энергетическим запасом, должна иметь число импульсов в пачке ПВИ и ее длительность без учета интервалов между импульсами соответственно  $N_{\text{ВП}(2)}^{P,1} = (N_{\text{ВП}}/10) = 10^6$  и  $\tau_{\text{ВЭВП}(2)}^{P,1} = 10^6 \tau_{\text{В}(2)}^{(1)} = 0,01$  с. При этом период повторения, длительность и скважность этих импульсов должны быть  $T_{\text{В}(2)}^{P,1} = 40$  нс,  $\tau_{\text{В}(2)}^{P,1} = 20$  нс и  $Q_{\text{В}(2)}^{P,1} = 2$ . В конце такой первой части структуры ПВИ должна быть вторая часть в виде свободного интервала времени (без заполнения импульсами ПВИ), равного  $\tau_{\text{T,max}} = 410$  нс. Он обеспечивает надежную релаксацию тепловых эффектов, вызванных воздействием первой части структуры ПВИ.

Полная длительность такой структуры пачек ПВИ соответственно

$$\tau_{\text{ВЭВП}(2)}^{P,1} = s [N_{\text{ВП}(2)}^{P,1} \cdot \tau_{\text{В}(2)}^{P,1} + \tau_{\text{T,max}}], \quad (4)$$

где  $s$  – необходимое число повторения обеих частей структуры пачки ПВИ в течение требуемого времени воздействия на ректенну приемной подсистемы БПЭ для передачи требуемой электрической мощности.

## Структура и взаимосогласованные требования к параметрам передающей и приемной подсистем БПЭ

В системах БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам для сокращения расстояния от передающих МСИ до зон безопасности целесообразно уменьшать размеры их позиций. Для снижения потерь и повышения коэффициента полезного действия (КПД) передачи энергии требуется взаимное согласование геометрических площадей ректенн и площадей поперечных сечений в точках  $z_F$  лучей электромагнитных излучений (ЭМИ) рассмотренных выше передающих подсистем на МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов.

Передающие подсистемы БПЭ на МСИ с фокусировкой таких сигналов можно реализовать, например, на существующих и описанных в [8] радиолокационных станциях (РЛС) с фазированными антенными решетками (ФАР) и когерентными импульсными сигналами. Их технические и конструктивные параметры можно принять исходными для передающих подсистем обеих предлагаемых систем БПЭ. Они имеют закрепленные на кабинах квадратные ФАР с размерами  $L_x=L_y=1,7$  м и высотой их фазовых центров  $h_a=5$  м [8].

Для систем передачи электроэнергии к наземным объектам (БПЭ-1) максимальную дальность фокусировки при высоте фазовых центров ФАР  $h_a$  в РЛС и ректенн  $h_p$  целесообразно задавать не более дальности прямой радиолокационной видимости  $D_{ПВ}$ . Последняя рассчитывается по известной упрощенной формуле [9]:

$$z_{F1} \leq D_{ПВ} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где  $D_{ПВ}$  имеет размерность [км],  $h_a$  и  $h_p$  - размерности [м]. Стандартными размещениями для БПЭ-1 можно считать установку РЛС с ФАР и ректенн на земной поверхности в типовых кабинах при  $h_a=h_p=5$  м, а также на специальных насыпях, пилонах или зданиях при  $h_a=h_p=10$  м. Тогда для БПЭ-1 при  $h_a=h_p=5$  м и  $h_a=h_p=10$  м требуемые дальности фокусировки будут равны:  $z_{F1} \leq D_{ПВ1} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2} = 4,12[(5)^2 + (5)^2]^{1/2} \approx 29$  км и  $z_{F1} \leq 4,12[(10)^2 + (10)^2]^{1/2} \approx 58$  км.

При создании системы БПЭ-2 к горному объекту с фазовым центром ректенны, расположенным на высоте от подножия горы  $h_{p2}=5$  км и на дальностях от точки его проекции на плоскость подножия до фазовых центров ФАР  $k$ -х РЛС в МСИ  $D_p=5$  км, требуемые наклонные дальности фокусировки будут не более:

$$z_{F2} \leq D_H = [(h_{p2})^2 + (D_{pm})^2]^{1/2} = [(25 \cdot 10^3)^2 + (25 \cdot 10^3)^2]^{1/2} \approx 7 \text{ км.}$$

Для снижения энергетических потерь сечения диаграмм направленности передающих МСИ и приемных ректенн таких БПЭ должны иметь круглые формы и, следовательно, круглые формы апертур ректенн. Радиусы круглых апертур ректенн  $r_{кр}$  должны быть, по возможности, небольшими для обеспечения требуемой повышенной устойчивости к ветровой нагрузке: для БПЭ-1 и БПЭ-2 можно соответственно принять:  $r_{кр1}=0,85$  м и  $r_{кр2}=0,75$  м.

Структура системы БПЭ-2 к труднодоступному высокогорному объекту, использующей приемную подсистему в виде круглой ректенны и МСИ, содержащую РЛС с ФАР, представлена на рис. 1.

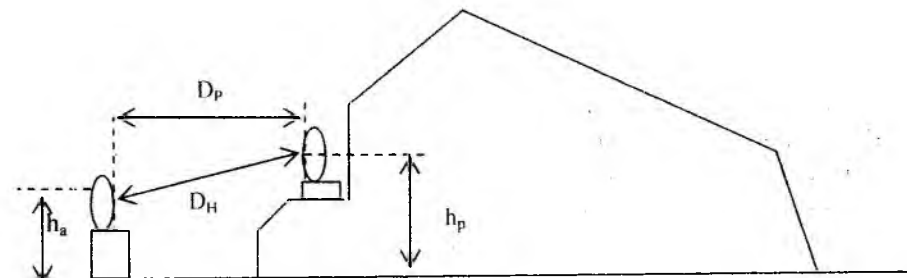


Рис. 1

На основании выполненного в [3] подробного анализа требований к подсистемам рассматриваемых БПЭ, результаты которого кратко изложены в предыдущем и данном подразделах, могут быть выбраны следующие взаимосогласованные параметры приемной и пере-

дающей подсистем БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам:

1. Передающие подсистемы: вогнутые сегментные МСИ с базами, определяемыми длинами хорд сегментов, и РЛС с ФАР, размещаемыми по дуге сегментов с радиусами  $r_{C1,2}$ :

1.1. Для подсистем БПЭ к наземным объектам база  $L_{M1}=1$  км, число РЛС с ФАР  $k_1=9$ , дальность фокусировки  $z_{F1} \leq r_{C1} = D_{ПВ} = 58$  км.

1.2. Для подсистем БПЭ к горным объектам база  $L_{M2}=670$  м, число РЛС с ФАР  $k_2=5$ , дальность фокусировки  $z_{F2} \leq D_H = r_{C2} = 7$  км.

1.3. Все ФАР должны содержать  $n_{ПД}=4$  квадратных подрешеток с размерами и числом излучателей соответственно:  $(L_{ПД})^2 = (85 \times 85)$  см<sup>2</sup> и  $n_{ПФ} = (n \times m) = (12)^2 = 144$ .

1.4. Длина волны и интервалы между излучателями при квадратной подрешетке, размере ее сторон  $L_{ПД} = 0,85$  м и числе излучателей  $n=m=12$  могут быть соответственно  $\lambda_0 \leq (L_{ПД}/n) = (0,85/12) \approx 0,07$  м и  $d_{ХПФ} = d_{УПФ} \approx 0,07$  м.

1.5. Коэффициенты усиления подрешеток ФАР при работе с узким лучом круглого сечения  $G_{ПФ} \approx (15000/4) = 3750$  [8].

2. Размеры апертур ректенн приемных подсистем БПЭ-2, а также БПЭ-1 могут быть равными  $A_{P2} = \pi(r_{P2})^2 = \pi(0,75)^2 = 1,77$  м<sup>2</sup> и  $A_{P1} = \pi(r_{P1})^2 = \pi(0,85)^2 = 2,27$  м<sup>2</sup>.

3. Обобщенная структура систем БПЭ-1 и БПЭ-2 на основе ректенн и МСИ, содержащих РЛС с ФАР, приведена (вид сверху) на рис. 2.

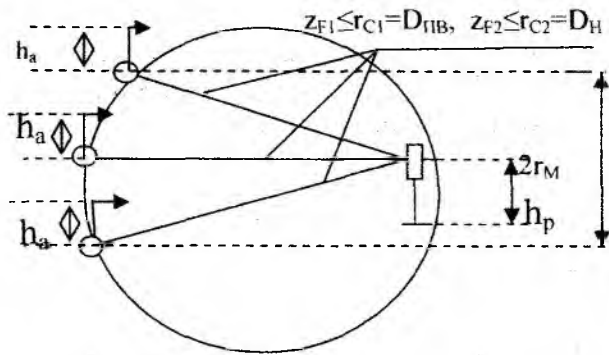


Рис. 2

4. Излучаемые сигналы: ОСД V-образные МЧ когерентные пачки простых радиоимпульсов:

4.1. Мощности радиоимпульсов в МЧ когерентной пачке для всех излучателей каждой из подрешеток ФАР около  $P_{nm} = 21,5$  Вт, а полная мощность импульсного излучения каждой подрешетки  $P_{ПФ} = n_{ПФ} \times P_{nm} = 144 \times 21,5 \approx 3,1$  кВт [8].

4.2. Диапазон начальных частот сигналов излучателей в  $k$ -х РЛС должен быть равен  $f_{0nm} \approx (4,3 \pm 0,1)$  ГГц, максимальный разнос частоты  $\Delta F_{\max(2)}^{P,1} = 50$  МГц и дискретность частоты  $\Delta F_{(2)}^{P,1} = 25$  МГц.

4.3. Структуру пачек ПВИ для исключения вывода ими ректенн из строя целесообразно создавать в виде двух частей, которые при необходимости длительного времени воздействия пачек ПВИ на ректенну приемной подсистемы БПЭ излучаются несколько раз подряд:

4.3.1. Первая часть структуры наряду с принятыми в предыдущих пп. 4.2 и 4.3 частотно-временными параметрами для исключения, как минимум, с десятикратным запасом возможности вывода из строя ректенн должна иметь соответственно следующие число импульсов в пачке ПВИ и ее длительность без учета интервалов между импульсами:

$$N_{ВП(2)}^{P,1} = (N_{ВП}/10) = 10^6 \text{ и } \tau_{ВСП(2)}^{P,1} = 10^6 \tau_{В(2)}^{P,1} = 0,01 \text{ с.} \quad (6)$$

Период повторения импульсов в первой части структуры пачек ПВИ при  $\tau_{В(2)}^{P,1} = 20$  нс принимается  $T_{В(2)}^{P,1} = 40$  нс и их скважность  $Q_{В(2)}^{P,1} = 2$ .

4.3.2. В конце такой первой части структуры ПВИ предусматривается вторая часть в виде свободного интервала времени (без заполнения импульсами ПВИ), равного  $\tau_{\text{т max}}=410$  нс. Он обеспечивает надежную релаксацию тепловых эффектов, вызванных воздействием первой части структуры ПВИ.

Полная длительность такой структуры пачек ПВИ определяется из соотношения (4)

### Реализуемость и зоны безопасности для предложенных систем БПЭ

Составными базовыми излучающими устройствами предлагаемых систем БПЭ являются отдельные подрешетки ФАР, входящие в РЛС передающих МСИ. В системах БПЭ к наземным объектам их число  $N_{1\text{МС}}=(k_1 \times n_{\text{ПД}})=(9 \times 4)=36$ , а к горным объектам  $N_{2\text{МС}}=(k_2 \times n_{\text{ПД}})=(5 \times 4)=20$ . Дальняя граница зоны Френеля подрешеток ФАР в обеих системах БПЭ  $z_{\text{ДП}}=[2(L_{\text{ПХ,У}})^2/\lambda_0]=[2(0,85)^2/0,07] \approx 20,6$  м, что намного меньше требуемых дальностей фокусировки ЭМИ  $z_{\text{F1}} \leq D_{\text{ПВ}}=58 \cdot 10^3$  м и  $z_{\text{F2}} \leq D_{\text{Н}}=7 \cdot 10^3$  м. В данном случае при равномерном амплитудном распределении сигналов излучателей по апертуре ФАР или МСИ,  $z_{\text{ДП}} \ll z_{\text{F1,2}}$  и одинаковых апертурных излучателях, учитывая, что при  $z_{\text{F1,2}} \geq z_{\text{Д1,2}}$  обеспечивается синфазное сложение полей, для расчета плотности потока мощности ОСД V-образных МЧ когерентных пачек простых радиоимпульсов может применяться выражение [3]:

$$S_{\text{max}(2)}^{\text{P,1}}(x, y, z, t) = N_{1,2\text{МС}}^2 \frac{P_{\text{ПФ}} G_{\text{ПФ}}}{4\pi z_{\text{F1,2}}^2} \quad (7)$$

Результаты расчетов достижимых максимальных спектральных плотностей потока мощности сфокусированных ПВИ  $S_{1,2 \text{max}(2)}^{\text{P,1}}$  при  $P_{\text{ПФ}}=3,1$  кВт и  $G_{\text{ПФ}}=3750$  для системы БПЭ-1 с  $N_{1\text{МС}}=36$  на расстояниях не более  $z_{\text{F1}}$  приведены в табл. 3, а для системы БПЭ-2 с  $N_{2\text{МС}}=20$  на расстояниях не более  $z_{\text{F2}}$  – в табл. 4.

Таблица 3

$S_{1 \text{max}(2)}^{\text{P,1}}$	1,21	0,54	0,3	0,132	0,076	0,049	0,04	0,035
$z_{\text{F1}}, \text{ км}$	10	15	20	30	40	50	55	60

Таблица 4

$S_{2 \text{max}(2)}^{\text{P,1}}$	3,0	2,3	1,81	1,47	1,22	1,02	0,87	0,745
$z_{\text{F2}}, \text{ км}$	3,5	4,0	4,5	5	5,5	6	6,5	7

При оценке реализуемости предлагаемых систем БПЭ с фокусировкой ЭМИ в МСИ, содержащих от 5 до 9 РЛС с ФАР по 4 подрешетки в каждой и имеющих большую суммарную мощность СВЧ излучения, важное значение приобретает вопрос о биологической защите обслуживающего персонала и населения в районе расположения передающих МСИ. В данном случае, поскольку  $z_{\text{ДП}} \ll z_{\text{F1,2}}$ , расстояние до зоны безопасности  $z_{1,2 \text{ЗБ}(2)}^{\text{P,1}}$  от подрешеток ФАР передающих МСИ можно оценивать по полученному из (7) выражения следующего вида:

$$z_{1,2 \text{ЗБ}(2)}^{\text{P,1}} \geq [N_{1,2\text{МС}}^2 P_{\text{ПФ}} G_{\text{ПФ}} / 4\pi S_{\text{Б}(2)}^{\text{P,1}}]^{1/2}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{Б}(2)}^{\text{P,1}} = S_{\text{НБ}} / \delta_{\text{бл}} \delta_{\text{ЗБ}} \delta_{\text{ОЧ}}$ ;  $S_{\text{НБ}}$  – норма безопасной работы в условиях СВЧ облучения;  $\delta_{\text{бл}}$  – коэффициент ослабления поля СВЧ в направлениях боковых лепестков по отношению к оси ДН антенны;  $\delta_{\text{ЗБ}}$  – коэффициент ослабления поля СВЧ при применении на краях ФАР защитных бленд (металлических козырьков) с покрытием их кромок радиопоглощающим материалом;  $\delta_{\text{ОЧ}}$  – коэффициент ослабления эквивалентной эффективности воздействия поля СВЧ на ткани и органы, не имеющие терморесепторов, к которым относятся зрачки глаз человека [10].

При выполнении оценок по (8) исходным условием принимается уровень спектральной плотности мощности ЭМИ ближних боковых лепестков ДН в интервале  $\pm(5...22)^\circ$  от оси ДН подрешеток ФАР. Это связано с тем, что оси последних устанавливаются неподвижно и без сканирования в направлении строго на фазовые центры ректенн систем БПЭ.

В [10, 11] указано, что для большинства реализуемых ФАР при типовом шаге квантования фазы  $\Delta\varphi_{\Phi}=11,25^{\circ}$  и числе излучателей  $n_{\text{ПФ}}=144$  значение коэффициента ослабления  $\delta_{\text{бл}}=-46$  дБ, за счет бленд с радиопоглощающими покрытиями на кромках значение  $\delta_{\text{зв}}=-20$  дБ, за счет использования очков типа ОРЗ-5 значение  $\delta_{\text{оч}}=-(30...20)$  дБ и норма безопасности  $S_{\text{НБ}}=10$  мкВт/см<sup>2</sup>. Тогда границы зон безопасности для систем БПЭ на наземные объекты с  $N_{\text{ГМС}}=36$  и на горные объекты с  $N_{2\text{ГМС}}=24$ , полученные по (8) при  $\delta_{\text{зв}}=\delta_{\text{бл}}\delta_{\text{зв}}$   $\delta_{\text{оч}}=116$  дБ  $=0,25 \cdot 10^{-11}$ , должны выбираться для операторов и местного населения, использующих очки, аналогичные типу ОРЗ-5, не менее  $z^{P,1}_{(2)\text{ЗБ1}} \geq 5,4$  м и  $z^{P,1}_{(2)\text{ЗБ2}} \geq 3,6$  м, а без таких защитных очков не менее  $z^{P,1}_{(2)\text{ЗБ1}} \geq 170^*$  м и  $z^{P,1}_{(2)\text{ЗБ2}} \geq 114^*$  м. Поэтому по периметру с тыловой стороны передающих МСИ необходимо создавать запретные зоны, в которых обслуживаемому персоналу, а тем более местному населению, нельзя находиться без защитных очков, аналогичных ОРЗ-5, для предлагаемых систем БПЭ-1 глубиной не менее 170\* м и для систем БПЭ-2 не менее 114\* м. В приведенных выше значениях границ зон безопасности  $z^{P,1}_{(2)\text{ЗБ1,2}}$  для случаев без использования обслуживающим персоналом и местным населением защитных очков типа ОРЗ-5 стоит сверх цифр знак (\*).

### Производительность систем БПЭ к наземным и горным объектам

Для оценки эффективности систем БПЭ на сфокусированных МСИ и ректеннах необходимо также оценить их производительность по передаче электрической мощности пачками ПВИ  $P^{P,1}_{\text{ВЭС}(2)}$  на дальности  $z_{\text{F1,2}}$  за время  $\Delta t^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)}$ , которое, как отмечалось, в  $s$  раз больше  $\tau^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)}$ , определяемого по (6).

Для такой оценки по значениям  $S^{P,1}_{1,2 \text{ max}(2)}$ , приведенным в табл. 3 и 4, требуется знание суммарного КПД ректенн  $\eta_{\Sigma}$  по преобразованию  $S^{P,1}_{1,2 \text{ max}(2)}$  в мощность постоянного тока. Теоретически и экспериментально полученные на масштабных моделях БПЭ значения  $\eta_{\Sigma}=\eta_{\text{СР}}\cdot\eta_0$ , где  $\eta_{\text{СР}}=P_{\Sigma}/P_{\Sigma}$ —КПД перехвата и выпрямления,  $\eta_0=P_0/P_{\Sigma}$ —КПД сбора мощности постоянного тока,  $P_{\Sigma}$ —сумма мощностей модулей при их оптимальной нагрузке, приведены в табл. 5 [12].

Таблица 5

Виды КПД исследуемых БПЭ	$\eta_{\text{СР}}, \%$	$\eta_0, \%$	$\eta_{\Sigma}, \%$
Образец экспериментальной модели БПЭ-1	43,0	87,9	37,8
Образец экспериментальной модели БПЭ-2	49,8	86,2	43,0
Средние по образцам моделей № 1 и № 2	46,4	87,5	40,4

Расчет мощности  $P^{P,1}_{\text{ВЭС}(2)}$  пачек ПВИ, сфокусированных на дальности  $z_{\text{F1,2}}$ , по данным табл. 3 – 5, учитывая выражение (6) для обеспечения структуры пачек ПВИ, необходимой при длительной работе и исключении вывода из строя ректенн с десятикратным запасом, выполнялся по следующим соотношениям [3]:

за время работы БПЭ в течение  $\tau^{(1)}_{\text{ВЭСП}(2)}=1$  с

$$S^{P,1}_{1,2 \text{ max}(2)} \cdot A_{\text{P1,2}} \cdot K_{\text{ир}} \cdot \eta_{\Sigma} / \tau^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)}, [Bm/c]; \quad (9)$$

за время непрерывной работы БПЭ в течение  $\Delta t^{(1)}_{\text{ВЭСП}(2)}$

$$P^{(1)}_{\text{ВЭС}(2)} = S^{(1)}_{1,2 \text{ max}(2)} \cdot A_{\text{P1,2}} \cdot K_{\text{ир}} \cdot \eta_{\Sigma} \cdot \Delta t^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)} / \tau^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)}, [Bm], \quad (10)$$

где  $K_{\text{ир}}=0,8$  – коэффициент использования апертуры ректенны.

Результаты такого расчета для предложенных БПЭ-1 и БПЭ-2 за время работы  $\Delta t^{P,1}_{\text{ВЭСП}(2)}=1, 8$  и 16 часов приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что на выходе системы БПЭ-1, при ее параметрах и дальностях до обслуживаемого объекта  $z_{\text{F1}}=(60...10)$  км за 8 часов непрерывной работы накапливается суммарная мощность постоянного тока, равная (0,75...25,6) МВт, а за 16 часов – (1,5...51,2) МВт. На выходе системы БПЭ-2 при ее параметрах и дальностях  $z_{\text{F2}}=(10...3,5)$  км за 8 часов непрерывной работы накапливается суммарная мощность постоянного тока, равная (12,3...49,4) МВт, а за 16 часов – (24,5...99,0) МВт.

Таблица 6

БПЭ-1, $Z_{F1}, км$	$P_{ВЭС(2)}^{(1)}, МВт$						БПЭ-2, $Z_{F2}, км$
	БПЭ-1, при $\tau_{ВЭС(2)}^{(1)}$			БПЭ-2, при $\tau_{ВЭС(2)}^{(1)}$			
	1 час	8 час	16 час	1 час	8 час	16 час	
60	$94 \cdot 10^{-3}$	0,749	1,5	1,53	12,3	24,5	7
55	0,106	0,845	1,69	1,79	14,3	28,7	6,5
50	0,130	1,04	2,08	2,1	16,8	33,6	6
40	0,202	1,613	3,226	2,51	20,1	40,2	5,5
30	0,349	2,8	5,6	2,7	26,3	52,7	5
20	0,792	6,34	12,7	3,73	29,8	59,6	4,5
15	1,43	11,4	22,8	4,74	37,9	75,8	4
10	3,2	25,6	51,2	6,18	49,4	99,0	3,5

Таким образом, приведенные структурно-алгоритмические предложения по построению, проведенные оценки реализуемости, производительности, условий биологической защиты операторов и местного населения от СВЧ излучений подтверждают возможности создания новых эффективных систем БПЭ к труднодоступным объектам на основе передающих подсистем МСИ, содержащих РЛС с ФАР и ПФЧ фокусировкой ОСД V-образных МЧ когерентных простых радиоимпульсов, а также приемных подсистем с ректеннами.

**Список литературы:** 1. Wunsch, D.S., Bell, R.R. Determination of threshold failure level of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci.- 1968. – № S-15, № 6.– P. 244–259. 2. Чумаков, В.И., Егоров, А.М., Лонин, Ю.Ф. и др. Моделирование теплового механизма в полупроводниках при воздействии импульсным электромагнитным полем // Problems of atomic science and technology. Series Nuclear Physics Investigations. – 2004. – № 2 (40). – P. 203–205. 3. Гомозов, А.В., Гомозов, В.И., Ермаков, Г.В., Титов, С.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / под ред. В.И. Гомозова. – Харьков : КП «Городская типография», 2011. – 330 с. 4. Панов, В.В., Саркисян, А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10–12. 5. Жоров, Н.Е., Решетов, В.А. Основы микроэлектроники // Теория и техника генерирования, излучения и приема радиолокационных сигналов / под ред. Ю.Н. Седышева. – Харьков : ВИРТА, МО СССР, 1986. Ч. 1. – С. 5–161. 6. Абдюханов, М.А., Биргер, Л.А. и др. СВЧ устройства на плупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. – М. : Сов. радио, 1969. – 580 с. 7. Меффенджер, Д., Аш, М. Радиационные эффекты в электронных системах / пер. с англ. – М. : Мир. 1988. – 435 с. 8. Техническое описание изделия 9А331, СН. – МО СССР, 1987. – Ч. 4. 9. Справочник офицера ПВО / под ред. Г.В. Зимина, С.К. Бурмистрова. – М. : Воениздат, 1987. – 512 с. 10. Абрамов, Л.А., Гомозов, В.И. и др. Радиопередающие устройства радиотехнических систем ПВО / под ред. А.И. Ергана. – Харьков : ВИРТА, МО СССР, 1975. – 419 с. 11. Скольник, М. Справочник по радиолокации. – М. : Сов. радио, 1977. – Т.2. – 408 с. 12. Шокало, В.М., Лучанинов, А.И., Рыбалко, А.М., Грецьких, Д.В. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем БПЭ микроволновым лучом. – Харьков : Коллегиум, 2006. – 308 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 04.09.2011