

УДК 623.454.36: 623.438.3.09

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.М. ДЕНИСЕНКО, канд. техн. наук (Подольский гос. аграр. техн. ун-т, г. Каменец-Подольский),
В.И. КОЦЮРУБА, канд. воен. наук (Нац. акад. обороны Украины, г. Киев)

Предложена усовершенствованная математическая модель обнаружения взрывоопасных предметов поисковым устройством, устанавливаемым на легких бронированных машинах, в основу которого положен индукционный метод. В отличие от существующих предлагаемая модель учитывает снижение эффективности обнаружения взрывоопасных предметов в грунте в зависимости от увеличения глубины их установки.

Запропоновано вдосконалену математичну модель виявлення вибухонебезпечних предметів пошуковим пристроєм, що встановлюється на легких броньованих машинах, в основу якого покладено індукційний метод. На відміну від існуючих запропонована модель враховує зниження ефективності виявлення вибухонебезпечних предметів у ґрунті залежно від збільшення глибини їх встановлення.

The updated mathematic model of detection of explosive items using a searching device, mounted on light armor machines and based on induction method, is proposed. As compared with existing models the proposed model accounts for a decrease in efficiency of detection of explosive items in the soil depending on increase in their deepening.

В современных вооруженных конфликтах малой интенсивности (Афганистан, Чечня, Ирак) все чаще используют взрывоопасные предметы (ВОП): инженерные и минометные мины, артиллерийские снаряды и пр. [1, 2].

Значительное увеличение количества ВОП в современных вооруженных конфликтах снижает противоминную защиту легких бронированных машин (ЛБМ) и приводит к повышению требований к системам, предназначенным для создания противоминной защиты ЛБМ. Военные специалисты для снижения эффективности поражения ЛБМ ВОП предлагают различные способы предотвращения их подрыва. При этом одним из них является оснащение ЛБМ поисковыми устройствами, в основу которых положены различные методы обнаружения [3].

Анализ публикаций [3–5] показал разную направленность существующих подходов к оценке эффективности противоминной защиты ЛБМ. Так, в работе [3] рассмотрены вопросы оценки защитной способности активной противоминной защиты ЛБМ, а предложен-

ная методика основывается на формировании множества альтернатив применения указанной системы, расчете показателя защищающей способности и выборе рационального варианта из возможных альтернатив ее состава по избранному критерию оценки. Рассмотренная в работе [4] математическая модель основана на вероятностных методах и позволяет оценить показатели эффективности поражения ЛБМ ВОП фугасного типа без учета эффективности их обнаружения. В работе [5] рассмотрены основные методы обнаружения скрытых объектов, в том числе и предметов в ферромагнитных корпусах, установленных как на поверхности грунта, так и в грунте. При этом предложены ответы на многие вопросы, связанные с обнаружением ВОП индукционным методом. Однако так же, как и в работах [4, 5], вопросы снижения эффективности обнаружения ВОП в ферромагнитных корпусах поисковым устройством с индукционным методом обнаружения в зависимости от увеличения глубины установки ВОП в грунте практически не рассматривались. Поэтому и возникает необходимость усовершенствования существующих подходов к оценке эффектив-

© А.М. ДЕНИСЕНКО, В.И. КОЦЮРУБА, 2009

ности обнаружения ВОП поисковым устройством с индукционным методом обнаружения, чему и посвящена настоящая статья.

Для оценки эффективности поискового устройства, установленного на ЛБМ, основанного на индукционном методе обнаружения, используем показатель вероятности достижения успеха [6–8]. При этом расчет вероятности обнаружения ВОП индукционным методом предлагаем производить по формуле

$$P_o = P_{\Pi} P_{o/\Pi}, \quad (1)$$

где P_{Π} — вероятность попадания ВОП в зону действия поискового устройства; $P_{o/\Pi}$ — вероятность обнаружения ВОП при условии их попадания в зону действия поискового устройства.

Расчет вероятности попадания ВОП в зону действия поискового устройства P_{Π} осуществляем по формуле из работы [4] (рис. 1)

$$P_{\Pi} = 1 - \exp \left[-2(b_{\Pi} + d_m) \int_0^x \mu(x) dx \right], \quad (2)$$

где b_{Π} — ширина зоны действия поискового устройства, установленного на ЛБМ и основанного на индукционном методе обнаружения, м; d_m — диаметр опасной зоны реагирования взрывателя ВОП, м; $\mu(x)$ — расход ВОП на единицу площади пути перемещения ЛБМ, м^{-2} ; x — длина пути перемещения ЛБМ, м.

Расстояние x , на которое передвигается ЛБМ за время t , зависит от скорости движения V ЛБМ на заминированном участке:

$$x = Vt. \quad (3)$$

Расход мин $\mu(x)$ на единицу площади пути перемещения ЛБМ, равномерно установленных на дороге, зависит от их количества n , длины L_d и ширины B_d заминированного участка дороги:

$$\mu(x) = \frac{n}{L_d B_d}. \quad (4)$$

Для расчета вероятности обнаружения ВОП при условии их попадания в зону действия поискового устройства предлагаем использовать формулу из работы [8]

$$P_{o/\Pi} = 1 - \exp(-\lambda_{\Pi} t_{\Pi}), \quad (5)$$

где λ_{Π} — интенсивность обнаружения ВОП, с^{-1} ; t_{Π} — время нахождения ВОП в зоне действия поискового устройства, с.

Интенсивность обнаружения ВОП λ_{Π} рассчитываем по формуле

$$\lambda_{\Pi} = \frac{1}{t_c}, \quad (6)$$

где t_c — время срабатывания поискового устройства (в среднем для расчета принимается $t_c \approx 0,5$ с), которое включает время срабатывания поискового элемента и время подачи соответствующего сигнала на пульт управления поискового устройства.

Используя схему обнаружения ВОП (рис. 2), время нахождения ВОП в зоне действия поискового устройства t_{Π} определяем по формуле

$$t_{\Pi} = \frac{B_{\text{к.з}}}{V}, \quad (7)$$

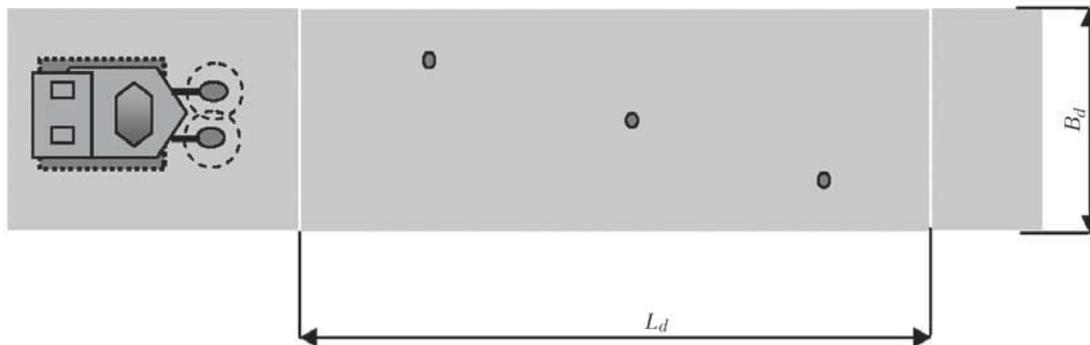


Рис. 1. Схема расчета вероятности попадания ВОП в зону действия поискового устройства, основанного на индукционном методе обнаружения и установленного на ЛБМ (L_d , B_d — соответственно длина и ширина заминированного участка дороги)

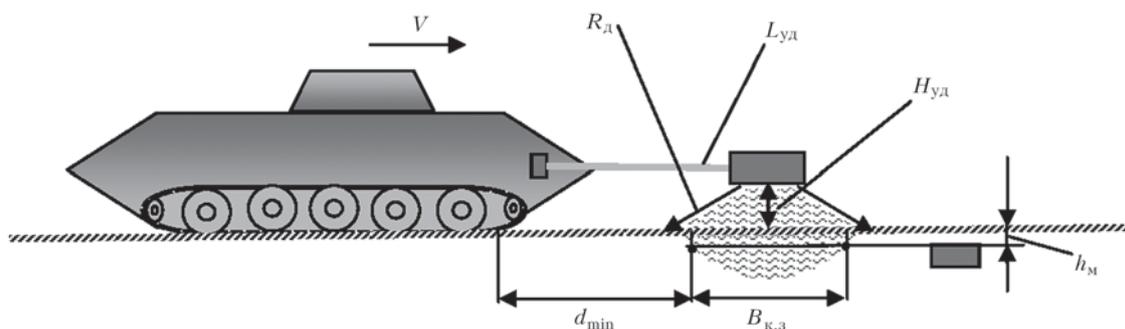


Рис. 2. Схема функционирования поискового устройства с индукционным методом обнаружения, установленного на ЛБМ (V — скорость ЛБМ; R_d — радиус действия первичного низкочастотного магнитного поля; $L_{уд}$ — удаление поискового элемента от корпуса ЛБМ; $H_{уд}$ — удаление поискового элемента от поверхности грунта; h_m — глубина установки ВОП в грунте; d_{min} — минимальная дальность обнаружения ВОП)

где $B_{к.з}$ — ширина контактной зоны действия первичного низкочастотного магнитного поля и регистрации вторичного магнитного поля от ферромагнитного объекта (ВОП из металла).

Как видно из рис. 2, расстояние $B_{к.з}$ зависит от удаления поискового элемента от поверхности грунта $H_{уд}$, глубины установки ВОП в грунте h_m и радиуса действия первичного низкочастотного магнитного поля R_d . Учитывая данное утверждение, ширину контактной зоны действия первичного низкочастотного магнитного поля и регистрации вторичного магнитного поля предлагаем определять графоаналитическим методом:

$$B_{к.з} = \begin{cases} 2\sqrt{R_d^2 - (H_{уд} + h_m)^2} & \text{при } R_d - H_{уд} > h_m, \\ 0 & \text{при } R_d - H_{к.з} \leq h_m. \end{cases} \quad (8)$$

При этом радиус действия первичного низкочастотного магнитного поля R_d определяем по уже известной формуле из работы [5]

$$R_d = \sqrt{\frac{12}{80\rho_b M_{2z}^2 D_a^2 r_{сф}^6 e} \frac{-8\pi z_r \sigma_{п}}{\lambda_{э.в}}}, \quad (9)$$

где ρ_b — волновое сопротивление свободного пространства, Ом; M_{2z} — магнитный момент генераторной катушки, А·м²; D_a — коэффициент, который определяет аномальное поле поверхности ВОП (принимает значение 0,9); $r_{сф}$ — радиус ВОП (мины), м; z_r — коэффициент проводимости грунта ($30 \text{ м}^4 \cdot \text{кг} / (\text{с}^3 \cdot \text{А}^2)$); $\sigma_{п}$ — удельная электрическая проводимость грунта, См/м; $\lambda_{э.в}$ — длина электромагнитной волны, м; $P_{пр}$ — плотность потока мощ-

ности вторичного магнитного поля (чувствительность приемной катушки), Вт/м².

Для расчета длины электромагнитной волны $\lambda_{э.в}$ используем следующую формулу [11]:

$$\lambda_{э.в} = \frac{2a_{п.э} b_{п.э}}{\sqrt{4b_{п.э}^2 + a_{п.э}^2}}, \quad (10)$$

где $a_{п.э}$, $b_{п.э}$ — соответственно длина и ширина поискового элемента поискового устройства, м.

При этом геометрические размеры поискового элемента поискового устройства рассматриваем как прямоугольный волновод [9].

Следует отметить, что при установке поискового устройства на базе ЛБМ (рис. 2) должны выполняться следующие условия:

$$d_{min} \geq s_T; \quad t_H \geq t_C, \quad (11)$$

где d_{min} — минимальная дальность обнаружения ВОП поисковым устройством, м; s_T — тормозной путь ЛБМ, м.

Минимальная дальность обнаружения ВОП поисковым устройством d_{min} (рис. 2) будет зависеть от расстояния $B_{к.з}$ и расстояния поискового элемента от корпуса ЛБМ $L_{уд}$:

$$d_{min} = L_{уд} - \frac{B_{к.з}}{2}. \quad (12)$$

Тормозной путь ЛБМ следует рассчитывать по формуле из работы [10]

$$s_T = t_T V + z_{т.с} \frac{k_э V^2}{\Phi}, \quad (13)$$

где t_T — время срабатывания тормозной системы ЛБМ (гидравлическая 0,2, пневматичес-

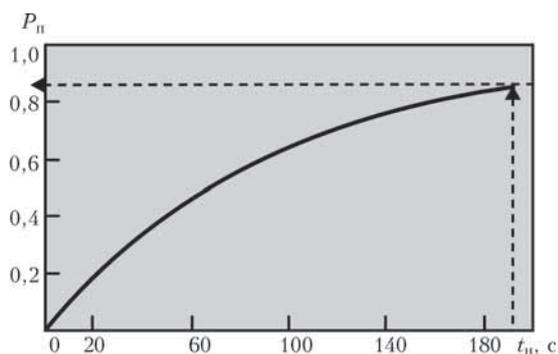


Рис. 3. Зависимость вероятности попадания ВОП в зону действия поискового устройства, установленного на ЛБМ и основанного на индукционном методе обнаружения, от времени движения ЛБМ по участку дороги

кая 0,4...0,8, механическая 0,8...1,1 с); k_3 — коэффициент, учитывающий эксплуатационные условия торможения колесами (1,1...1,4), гусеничной лентой (0,8...1,1); ϕ — коэффициент сцепления колеса с грунтом (0,4...0,6), гусеничной лентой (0,8...1); $z_{т.с}$ — коэффициент системы торможения, равный $0,004 \text{ с}^2/\text{м}$.

Использование рассмотренной математической модели дает возможность определить вероятность обнаружения ВОП в металлических корпусах поисковым устройством с индукционным методом обнаружения, установленным на ЛБМ, и обосновать требования к эксплуатационным и техническим характеристикам устройств данного типа.

Приведем пример. Возьмем следующие исходные данные: $V = 2 \text{ м/с}$, $b_{п} = 2 \text{ м}$, $d_{м} = 0,25 \text{ м}$, $t = 200 \text{ с}$, $n = 3$, $L_d = 400 \text{ м}$, $B_d = 6 \text{ м}$, $a_{п.э} = 0,4 \text{ м}$, $b_{п.э} = 0,3 \text{ м}$, $M_{2z} = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, $\rho_{в} = 377 \text{ Ом}$, $\sigma_{п} = 10^{-4} \text{ См/м}$, $r_{сф} = 0,18 \text{ м}$,

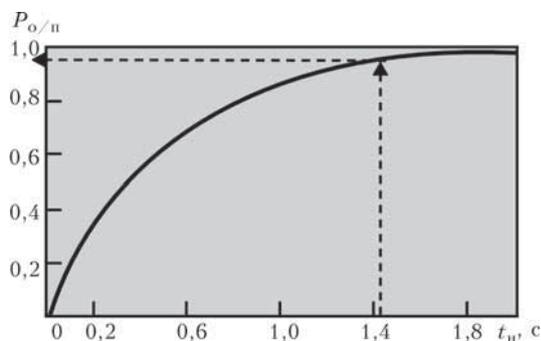


Рис. 4. Зависимость условной вероятности обнаружения ВОП от времени его нахождения в зоне действия поискового устройства, установленного на ЛБМ и основанного на индукционном методе обнаружения

$D_a = 0,9$, $P_{пр} = 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$, $z_{г} = 30 \text{ м}^4\cdot\text{кг}/(\text{с}^3\cdot\text{А}^2)$, $L_{уд} = 2 \text{ м}$, $H_{уд} = 0,5 \text{ м}$, $t_{н} \approx 0,5 \text{ с}$, $t_{т} = 0,4 \text{ с}$, $k_3 = 1,3$, $z_{т.с} = 0,004 \text{ с}^2/\text{м}^2$, $\phi = 0,8$, $h_{м} = 0,1 \text{ м}$.

Для выбранных исходных данных с помощью системы компьютерной математики Mathcad 2001i в предложенной последовательности проведены расчеты.

Как видно из рис. 3, вероятность попадания ВОП в зону действия поискового устройства для выбранных исходных данных за время $t = 200 \text{ с}$ движения ЛБМ по заминированному участку дороги примет значение $P_{п} = 0,83$.

С помощью формул (5)...(10) получены результаты расчетов условной вероятности обнаружения ВОП для расчетного времени $t_{н}$ его нахождения в зоне действия поискового устройства, установленного на ЛБМ и основанного на индукционном методе обнаружения (рис. 4). Условная вероятность обнаружения ВОП при полученном результате расчета времени $t_{н} = 1,5 \text{ с}$ его нахождения в зоне действия поискового устройства равна $P_{о/п} = 0,95$ (рис. 4).

Следовательно, полная вероятность $P_о$ обнаружения ВОП поисковым устройством с индукционным методом обнаружения, установленным на ЛБМ, определенная по формуле (1), примет значение

$$P_о = 0,83 \cdot 0,95 = 0,79.$$

Результаты расчетов минимальной дальности обнаружения ВОП (формула (12)) $d_{\min} = 1,75 \text{ м}$ и тормозного пути (формула (13)) $s_{т} = 0,42 \text{ м}$ указывают на соответствие условию (11), что позволяет утверждать о правильно выбранном удалении поискового элемента от ЛБМ в зависимости от скорости ее движения. При этом расчетное время $t_{н} = 1,5 \text{ с}$ нахождения ВОП в зоне действия первичного магнитного поля поискового элемента значительно больше времени $t_c = 0,5 \text{ с}$ срабатывания поискового устройства (условие (11)), что позволяет утверждать о достаточно большой вероятности своевременного реагирования поискового устройства на попавшую в его зону действия ВОП.

Таким образом, предложенная авторами математическая модель позволяет обосновать оптимальные условия обнаружения ВОП, требования к эксплуатационным характеристикам ЛБМ при обнаружении ВОП поисковым устройством (таких, как скорость движения ЛБМ во время поиска), технические характеристики поискового устройства (ширину зоны действия, дальность и глубину обнаружения). 🦋

1. *Нижаловский А.М.* На дорогах Чечни // Арм. сб. — 1997. — № 1. — С. 27–29.
2. *Воробйов В.С.* Організація інженерного забезпечення у воєнних конфліктах різної інтенсивності // Наука і оборона. — 1999. — № 1. — С. 91–96.
3. *Денисенко А.М.* Методика оценки защитной способности системы активной противоминной защиты легких бронированных машин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2007. — № 2. — С. 3–8.
4. *Денисенко А.М., Зиркевич В.Н., Андриенко А.М.* Математическая модель поражения легких бронированных машин взрывоопасными предметами фугасного типа // Там же. — 2007. — № 4. — С. 34–37.
5. *Щербаков Г.Н.* Обнаружение скрытых объектов. — М.: АРБАТ-ИНФОРМ, 2004. — 139 с.
6. *Барабаш Ю.Л.* Основи теорії оцінювання ефективності складних систем (методологія військових наукових досліджень). — К.: НАОУ, 1999 — 39 с.
7. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. — М.: Сов. радио, 1972. — 572 с.
8. *Юрков Б.Н.* Исследование операций. — М.: ВИА, 1990. — 528 с.
9. *Калашников А.М., Степук Я.В.* Колебательные системы. — М.: Воениздат, 1971. — 224 с.
10. *Бородин Н.Г., Андросов А.Н.* Машины инженерного вооружения. Ч.1. Общая характеристика. Машины для преодоления разрушений и механизации земляных работ. — М.: Воениздат, 1986. — 422 с.