

# АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

© 2023 г. Хун Чен<sup>1,\*</sup>, Бинтинг Чжа<sup>1,\*\*</sup>, Чэнцзюнь Ван<sup>1</sup>, Ци Чжун<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северный университет науки и технологий, Нанкин, 210094 Китай  
E-mail: \*cz\_chenhong@126.com; \*\*zhabingting@163.com

Поступила в редакцию 30.03.2023; после доработки 24.04.2023

Принята к публикации 26.04.2023

Данное исследование нацелено на изучение влияния различных параметров системы электростатической индукции на измеряемые характеристики объекта при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Основываясь на принципе электростатической индукции, впервые была установлена модель системы и математическая модель для одноэлектродного электростатического обнаружения. Проанализировано влияние различных факторов на ключевые данные, получаемые при одноэлектродном электростатическом обнаружении. На его основе разработана новая модель двухэлектродного электростатического обнаружения, обоснование такого метода подробно описано. Проводилось сравнительное исследование с использованием теоретического и компьютерного моделирования. Результаты показывают, что новая система двухэлектродного электростатического обнаружения показывает себя значительно лучше, чем ее одноэлектродный аналог. Также отмечается, что расстояние до заряженного объекта по вертикали оказывает большее влияние на эффективность обнаружения по сравнению с интервалом между двумя электродами. Более того, было обнаружено, что расстояние по вертикали и интервал между двумя электродами оказывают гораздо более существенное влияние на эффективность электростатического обнаружения, чем какие-либо другие факторы.

*Ключевые слова:* электростатическое обнаружение, система электростатической индукции, влияющие факторы, компьютерное моделирование.

DOI: 10.31857/S0130308223060039, EDN: AADJCB

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Статическое электричество возникает, когда различные вещества вступают в контакт, разделяются или трутся друг о друга. Такие производственные процессы, как экструзия, резка, перемешивание и фильтрация, могут генерировать статическое электричество. Учитывая, что оно может стать причиной серьезных угроз безопасности на производстве, следует тщательно следить за возможностью возникновения статического электричества. Последствия воздействия накопленного статического электричества могут быть серьезными и привести к выходу из строя, взрывам и пожарам дорогостоящих электронных устройств [1].

По мере развития науки и техники самолеты, высокоскоростные поезда и ракеты стали широко использоваться в обществе. Во время полета летающие объекты в воздухе неизбежно заряжаются статическим электричеством в результате различных процессов, таких как электризация трением, индукционная электризация и плазменная электризация вследствие работы двигателя [2]. Установлено, что заряд реактивного самолета может достигать  $10^{-3}$  С, в то время как заряд вертолета может достигать  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  С [3]. Это приводит к образованию детектируемого электростатического поля в диапазоне тысяч метров вокруг летающего объекта. Это поле обычно имеет потенциал в десятки тысяч вольт и даже может достигать 500 кВ. Это значение может быть измерено на расстоянии тысяч метров [4]. Распространение движущихся объектов может быть обнаружено с помощью их статических характеристик, а также получены соответствующие изменения параметров в различных заряженных объектах, различных фоновых атмосферных электрических полях и различных режимах при наличии шумов [5].

Электростатическое обнаружение — это метод получения необходимой информации об объекте путем регистрации электростатического поля в окружающем пространстве [6]. Пассивная бесконтактная технология электростатического обнаружения, в частности, определяет расстояние до объекта, полагаясь на индуцированные заряды, возникающие на измерительном электроде под воздействием электростатического поля объекта [7]. А. Kimoto и др. [8] использовали электростатические датчики для контакта с материалами и добились эффективной идентификации конкретных материалов и их твердости по разнице в амплитуде индуцированного напряжения. Однако на эффективность этого подхода влияют различные факторы, присущие системе электростатической индукции. В данном исследовании рассматривается влияние этих факторов на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения на основе модели электростатической систе-

мы обнаружения и математической модели в соответствии с принципом электростатической индукции. Также проводится сравнительное исследование между теорией и компьютерным моделированием.

## 2. ПРИНЦИП ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Фундаментальный принцип, лежащий в основе электростатического обнаружения, связан с явлением электростатической индукции. Согласно теории, когда металлический проводник находится вблизи с заряженным объектом, на ближайшем к заряженному объекту конце проводника индуцируется заряд, знак которого противоположен знаку заряда объекта, в то время как на другом конце проводника индуцируется ровно такой же по модулю заряд, но противоположного знака. В то же время поле системы заряженный объект—индуцированные заряды формирует полевое взаимодействие, которое перераспределяет заряды внутри проводника, пока они не придут в состояние электростатического равновесия. Такое перераспределение, как правило, происходит стремительно.

Согласно теореме Гаусса, легко рассчитать плотность заряда  $\rho$  в произвольной точке на поверхности металлического проводника вблизи заряженного объекта [12]:

$$\rho = \varepsilon_0 E, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — проницаемость вакуума;  $E$  — напряженность электрического поля.

Затем суммарное количество  $q$  индуцированных зарядов противоположного знака на ближней к заряженному объекту стороне металлического проводника рассчитывается таким образом:

$$q = \int_S \varepsilon_0 E dS, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь, на которой металлический проводник и заряженный объект обладают зарядами противоположного знака.

Когда заряженный объект и металлический проводник движутся относительно друг друга, относительное изменение электрического поля между ними вызывает изменение индуцированного заряда в металлическом проводник. Такой заряд, в свою очередь, приводит к изменению электрического тока. Уравнение для такого изменения тока выглядит как

$$i = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \int_S \frac{dE}{dt} dS. \quad (3)$$

Как можно видеть из формулы, электрический ток пропорционален изменению электрического поля объекта. Следовательно, детектируя изменения электрического тока, возможно получать информацию о движении заряженных объектов относительно металлического проводника.

## 3. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖЕНИИ

Метод электростатического обнаружения связан с обнаружением изменений в электростатическом поле объекта контроля для получения достоверных данных. Чтобы облегчить этот процесс, необходимо создать математическую модель, связанную с информацией об электрическом поле объекта контроля [3]. Вышеупомянутый металлический проводник можно заменить бесконечно тонкой индукционной электродной пластиной, которая по-прежнему удовлетворяет принципу электростатической индукции.

### 3.1. Создание математической модели электрического тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении

В первую очередь была разработана математическая модель электрического тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении. При условии, что измерительная пластина сталкивается с заряженным объектом, идеальным маленьким шариком с зарядом  $Q$ , площадь индукционной электродной пластины для электростатического обнаружения  $J_1$  равна  $S$ . Начальное положение шарика  $x_0$ , он движется горизонтально с относительной скоростью  $v$ ;  $x$  — проекция перемещения заряженного шарика относительно центральной точки электродной пластины;  $y$  — расстояние до

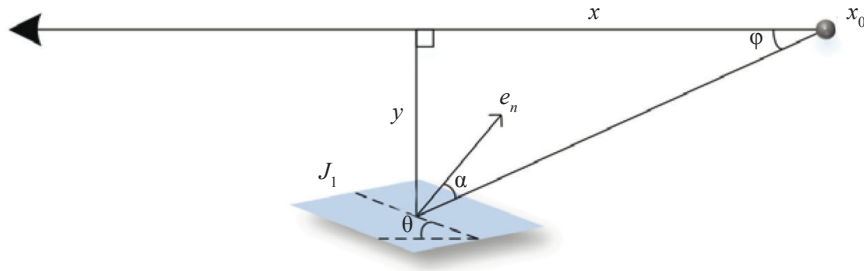


Рис. 1. Схема расположения заряженного объекта и электродной пластины  $J_1$ .

объекта;  $e_n$  — направление нормали к электродной пластине  $J_1$ ;  $\theta$  — угол между поверхностью электродной пластины и траекторией шарика, изменяющийся в диапазоне  $0—90^\circ$ . Схема расположения заряженного объекта и электродной пластины  $J_1$  показана на рис. 1 [13].

Когда заряженный объект и чувствительная пластина движутся относительно друг друга, изменение относительного электрического поля индуцирует изменение индуцируемого в электроде заряда, что приводит к изменению тока. Таким образом, формула (3) может быть преобразована в [14]:

$$i_1 = \varepsilon_0 S \frac{dE_n}{dt}, \quad (4)$$

где  $E_n$  — нормальная компонента напряженности поля в точке  $P$ .

Согласно закону Кулона, напряженность электростатического поля  $E$  вокруг заряженного объекта определяется:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0(x^2 + y^2)}; \quad (5)$$

$$E_n = E \cos \alpha. \quad (6)$$

Из рис. 1 следует:

$$\alpha = 90^\circ - (\varphi + \theta); \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta, \quad (8)$$

$$\text{где } \sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Легко показать, что формулы (5) и (8) преобразуются в формулу (6):

$$E_n = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0(x^2 + y^2)^{3/2}}(x \sin \theta + y \cos \theta); \quad (9)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{(x^2 + y^2)^{5/2}} \frac{dx}{dt}, \quad (10)$$

где  $x = x_0 + vt$ , затем подставляем  $\frac{dx}{dt} = v$  в формулу (10):

$$\frac{dE_n}{dt} = \frac{Qv}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{(x^2 + y^2)^{5/2}}. \quad (11)$$

Наконец, если это подставить в формулу (4), получаем:

$$i_1 = \frac{QvS \sin \theta (y^2 - 2x^2) - 3xy \cos \theta}{4\pi (x^2 + y^2)^{5/2}}. \quad (12)$$

Данные о положении заряженного объекта могут быть получены по изменению тока обнаружения.

### 3.2. Создание математической модели электрического тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении

Принцип двухэлектродного электростатического обнаружения показан на рис. 2. Измерительный электрод состоит из 2 измерительных пластин (электрод  $J_1$  и электрод  $J_2$ ), разделенных средой. Для обнаружения индуцированных токов электрическая цепь спроектирована таким образом, что каждый электрод соединен с резистором  $R$ . Когда электрическое поле заряженного объекта изменяется, то изменяется и индуцированный на электродах  $J_1$  и  $J_2$  заряд. При определении незначительной разности токов может быть получена информация о расположении заряженного объекта [15].

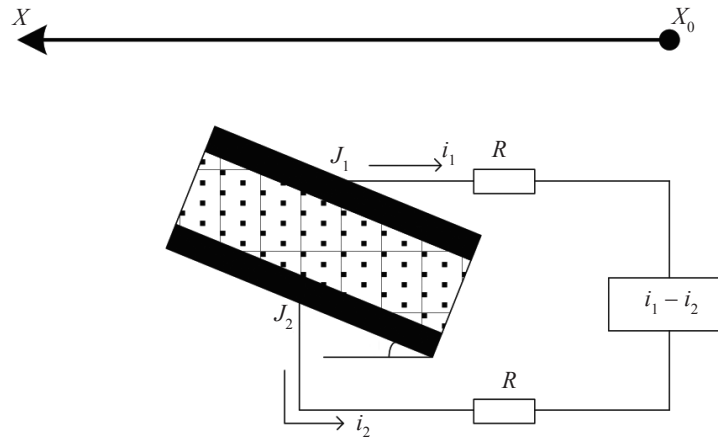


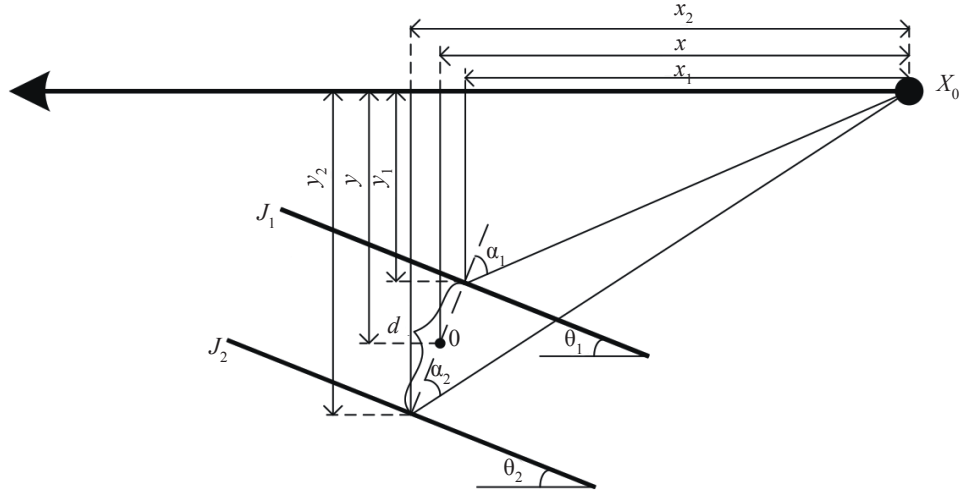
Рис. 2. Структурная схема системы двухэлектродного электростатического обнаружения.

Аналогично предполагая, что заряженный объект является идеальным маленьким шариком, обозначим его заряд как  $Q$ ; электростатическая индукция обнаружения электродных пластин  $J_1$  и  $J_2$  —  $S$ ; начальное положение шарика —  $x_0$ ; он движется горизонтально с относительной скоростью  $v$ ; начало координат — центр  $0$  двух электродных пластин;  $x$  и  $y$  — расстояние горизонтального перемещения и расстояние до заряженного шарика от центральной точки  $0$  двух электродных пластин соответственно; расстояние между пластинами —  $d$ ;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — углы между поверхностями электродов траекторией относительного движения; их диапазон —  $0$ — $90^\circ$ ; углы между напряженностью электрического поля заряженного объекта и нормальными к поверхностям  $J_1$  и  $J_2$  —  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Для облегчения понимания принципа двухэлектродного электростатического обнаружения и упрощения модели системы на рис. 3 представлена упрощенная схема.

Из формулы (12), в соответствии с рис. 3, нетрудно понять, что токи  $i_1$  и  $i_2$ , регистрируемые на электродных пластинах  $J_1$  и  $J_2$ , определяются так:

$$i_1 = \frac{QvS \sin \theta_1 (y_1^2 - 2x_1^2) - 3x_1 y_1 \cos \theta_1}{4\pi (x_1^2 + y_1^2)^{5/2}}, \quad (13)$$

Рис. 3. Схема расположения заряженного объекта и электродных пластин  $J_1$  и  $J_2$ .

$$i_2 = \frac{QvS \sin \theta_2 (y_2^2 - 2x_2^2) - 3x_2 y_2 \cos \theta_2}{4\pi (x_2^2 + y_2^2)^{5/2}}, \quad (14)$$

где  $x_1$  и  $y_1$  — расстояние горизонтального перемещения и расстояние до заряженного шарика от центра электродной пластины  $J_1$  соответственно;  $x_2$  и  $y_2$  могут быть получены таким же образом.  $x_1, x_2, y_1$  и  $y_2$  определяются по  $x$  и  $y$  в соответствии с рис. 3:

$$x_1 = x - \frac{d}{2} \sin \theta_1; \quad (15)$$

$$y_1 = y - \frac{d}{2} \cos \theta_1; \quad (16)$$

$$x_2 = x + \frac{d}{2} \sin \theta_2; \quad (17)$$

$$y_2 = y + \frac{d}{2} \cos \theta_2. \quad (18)$$

Подставляя формулы (15) и (16) в формулу (14) и формулы (17) и (18) в формулу (15), в итоге получаем выражение разности токов  $i = i_1 - i_2$ , наводимых в электродных пластина  $J_1$  и  $J_2$ :

$$i = \frac{QvS}{4\pi} \left\{ \frac{\sin \theta_1 \left[ \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)^2 - 2 \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right)^2 \right] - 3 \cos \theta_1 \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right) \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)}{\left[ \left( x - \frac{d}{2} \sin \theta_1 \right)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \cos \theta_1 \right)^2 \right]^{5/2}} - \frac{\sin \theta_2 \left[ \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)^2 - 2 \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right)^2 \right] - 3 \cos \theta_2 \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right) \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)}{\left[ \left( x + \frac{d}{2} \sin \theta_2 \right)^2 + \left( y + \frac{d}{2} \cos \theta_2 \right)^2 \right]^{5/2}} \right\}. \quad (19)$$

Приведенная выше формула представляет собой выражение разности токов при двухэлектродном электростатическом обнаружении.

Как показано на рис. 3, соответствующие потенциалы на электродных пластинах  $J_1$  и  $J_2$  могут быть выражены:

$$u_1 = \varphi_{J_1} = \frac{dE_1}{2}; \quad (20)$$

$$u_2 = \varphi_{J_2} = \frac{dE_2}{2}, \quad (21)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  могут быть получены из формулы (9):

$$E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(x_1^2 + y_1^2)^{3/2}}(x_1 \sin \theta_1 + y_1 \cos \theta_1); \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(x_2^2 + y_2^2)^{3/2}}(x_2 \sin \theta_2 + y_2 \cos \theta_2). \quad (23)$$

Затем (22) подставляется в формулу (20), а (23) подставляется в формулу (21). Выражение для разности потенциалов, генерируемой на электродных пластинах представляется как

$$u = \frac{Qd}{8\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{x \sin \theta_1 + y \cos \theta_1 - d/2}{[(x - d \sin \theta_1/2)^2 + (y - d \cos \theta_1/2)^2]^{3/2}} - \frac{x \sin \theta_1 + y \cos \theta_1 + d/2}{[(x + d \sin \theta_1/2)^2 + (y + d \cos \theta_1/2)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (24)$$

Обозначенная выше формула представляет собой выражение разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении.

#### 4. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

##### 4.1. Сравнительный анализ одноэлектродного и двухэлектродного электростатического обнаружения

###### а) Влияние угла $\theta$ на эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения

Было исследовано влияние угла  $\theta$  на эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения. Предположим, что заряд шарика  $Q = 1 \times 10^{-5}$  С, интервал его перемещения  $x = -10 \sim 10$  м, а расстояние до шарика  $y = 5$  м, на таком расстоянии шарик может рассматриваться как точечный заряд. Относительная скорость движения снаряда  $v = 1000$  м/с, чувствительный участок пластины  $S = 0,02$  м<sup>2</sup>, центр электродной пластины  $x = 0$  м. Полагая, что  $\theta$  равен 0, 45 и 90°, формула (12) использовалась в Matlab для математического моделирования. Форма сигнала тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 4.

Во время движения заряженного объекта (по мере его приближения) на свободный заряд электрода действует большая сила электрического поля, что приводит к большему изменению индуцированного заряда и большему индуцированному току. Из формулы (4) получается, что индуцированный ток не связан с напряженностью электрического поля, но пропорционален скорости изменения электрического поля. Из формы сигнала  $\theta = 0^\circ$  видно, что при моделировании заряженный объект движется прямо над чувствительным электродом, и расстояние между ними наименьшее. В этой точке напряженность электрического поля, перпендикулярная направлению электрода, наибольшая, в результате чего в  $x = 0$  м образуется полюс. Следовательно, изменение напряженности электрического поля равно 0, а ток  $i_1$  тоже равен 0 [16]. Анализируя движение нулевой точки индуцированного тока формы сигнала  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , можно заключить, что при относительном движении объекта и электрода, как только электрическое поле становится перпендикулярным электроду, относительное положение заряженного объекта и электрода изменяется, что приводит к изменению полюса электрического поля. Следовательно, точка нуля  $i_1$  изменяется.

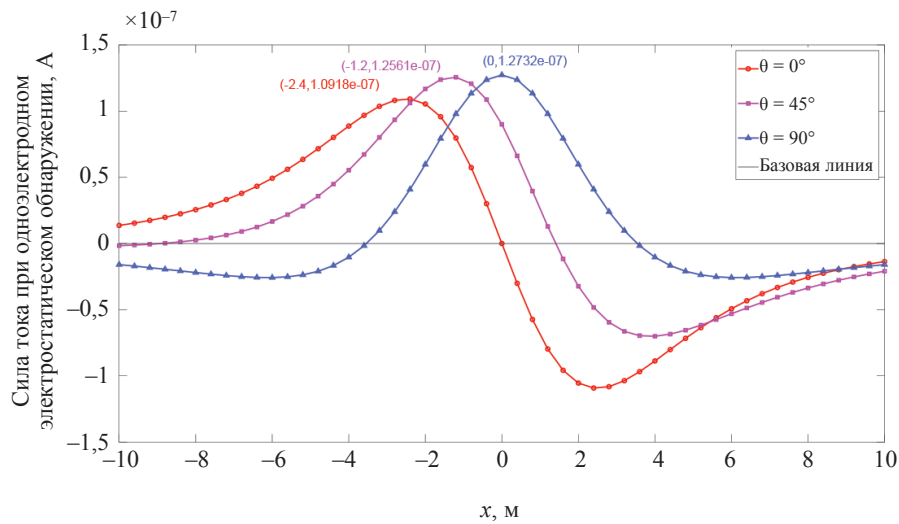


Рис. 4. Форма сигнала тока при одноэлектродном электростатическом обнаружении.

Сравнивая формы сигналов тока при контроле одним электродом при  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , можно прийти к выводу, что при увеличении угла  $\theta$  (диапазон  $\theta$  в пределах  $0 \sim 90^\circ$ ) максимальное значение тока  $i_1$  соответственно увеличивается. Когда  $\theta = 90^\circ$ ,  $i_1$  принимает максимальное значение в  $x = 0$  м, и результаты расчета показывают, что  $i_{1\max} = 1,2732 \times 10^{-7}$  А.

#### б) Влияние угла $\theta$ на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения

Используя выражения для параметров объекта разности токов и разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении, проводится математическое моделирование тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Было предположено, что интервал между пластинами  $d = 5$  м, а центр пластин находится в  $x = 0$  м, принимая во внимание все предположения, обозначенные выше. Также предположено, что  $\theta = \theta_1 = \theta_2$  принимают три значения:  $0$ ,  $45$  и  $90^\circ$ , которые в сочетании в формулами (19) и (24) подставляются в Matlab для расчетов.

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 5.

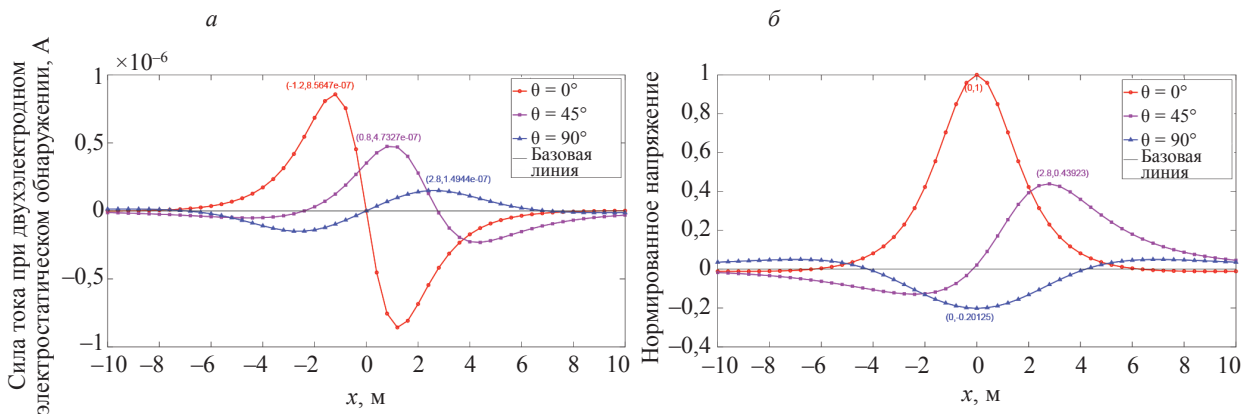


Рис. 5. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Сравнивая формы сигналов тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении и нормированного напряжения при  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  и  $\theta = 90^\circ$ , был сделан вывод, что при увеличении угла  $\theta$  (диапазон изменения  $\theta$  составляет  $0^\circ \sim 90^\circ$ ) максимальные значения тока  $i$  и разности потенциалов  $u$  уменьшаются. Когда  $\theta = 0^\circ$ ,  $i$  и  $u$  принимают наибольшие значения при  $x = \pm 1,2$  м и  $x = 0$  м соответственно, а по результатам моделирования  $i_{\max} = \pm 8,5647 \times 10^{-7}$  А.



**в) Анализ результатов математического моделирования**

При сравнительном анализе было обнаружено, что с увеличением угла  $\theta$  динамика максимумов тока при одноэлектродном и двухэлектродном электростатическом обнаружении противоположна. При одинаковых условиях эффективность использования тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении значительно выше, чем при одноэлектродном. Таким образом, обнаружение заряженных объектов с помощью двойного электрода дает лучшие результаты, при этом оптимальный угол составляет  $\theta = 0^\circ$ .

В следующем расчете (для достижения наилучших результатов)  $\theta = \theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$  подставляются в формулы (19) и (24), а математическая модель может быть упрощено до вида:

$$i = \frac{Qvs}{4\pi} \left\{ \frac{3x\left(y + \frac{d}{2}\right)}{\left[x^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right]^{5/2}} - \frac{3x\left(y - \frac{d}{2}\right)}{\left[x^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2\right]^{5/2}} \right\}; \tag{25}$$

$$u = \frac{Qd}{8\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{y - d/2}{\left[x^2 + (y - d/2)^2\right]^{3/2}} - \frac{y + d/2}{\left[x^2 + (y + d/2)^2\right]^{3/2}} \right\}. \tag{26}$$

**4.2. Математическое моделирование двухэлектродного электростатического обнаружения**

Две чувствительных электродных пластины в системе двухэлектродного электростатического обнаружения и обнаруживаемый заряженный объект образуют полную систему электростатической индукции. Формулы (25) и (26) показывают, что амплитуда тока обнаружения  $i$  и разность потенциалов  $u$  прямо пропорциональны величине заряда  $Q$  объекта, относительной скорости движения  $v$  и площади электродов  $S$ . При математическом моделировании двухэлектродного электростатического обнаружения главной целью было исследовать влияние расстояние до объекта  $y$  и интервала  $d$  между двумя электродами на ток обнаружения  $i$  и разность потенциалов  $u$ .

**а) Влияние расстояние до объекта  $y$  на эффективность контроля**

Расстояние до объекта прямо влияет на ток обнаружения, разность потенциалов, расстояние обнаружения и форму сигналов. Для анализа расстояния до объекта  $y$  предполагается, что расстояние до объекта бесконечное, т.е. расстояние между электродами и заряженным объектом бесконечно, а в электродах не наводится сигнал. При постепенном уменьшении расстояние до объекта  $y$ , в электроде постепенно наводится сигнал. Устанавливая  $d = 1$  м и оставшиеся предположения неизменными, предполагается, что  $y$  принимает три значения: 5, 4 и 3 м, которые в сочетании с формулами (25) и (26) подставляются в Matlab для расчетов.

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 6.

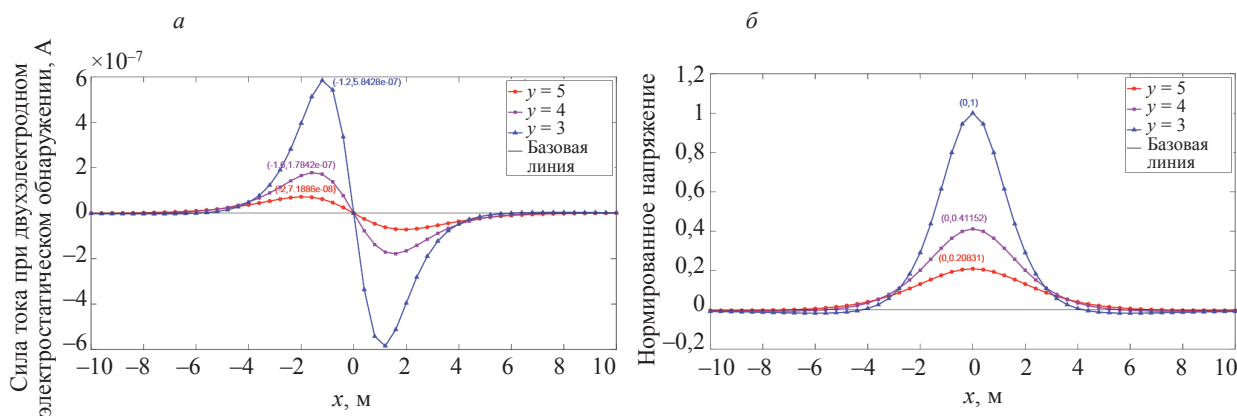


Рис. 6. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).



Исходя из рис. 6, можно сделать вывод, что максимальное значение тока и разности потенциалов увеличивается с уменьшением расстояния до объекта, поэтому увеличение расстояния до объекта приводит к уменьшению расстояния до объекта.

Чтобы лучше проиллюстрировать влияние расстояния до объекта на выходной сигнал, на рис. 7 показано изменение тока обнаружения и разности потенциалов индукционного электрода при изменении расстояния между заряженным объектом и электродом в пределах  $-10 \sim 10$  м и расстояние до объекта —  $3 \sim 5$  м.

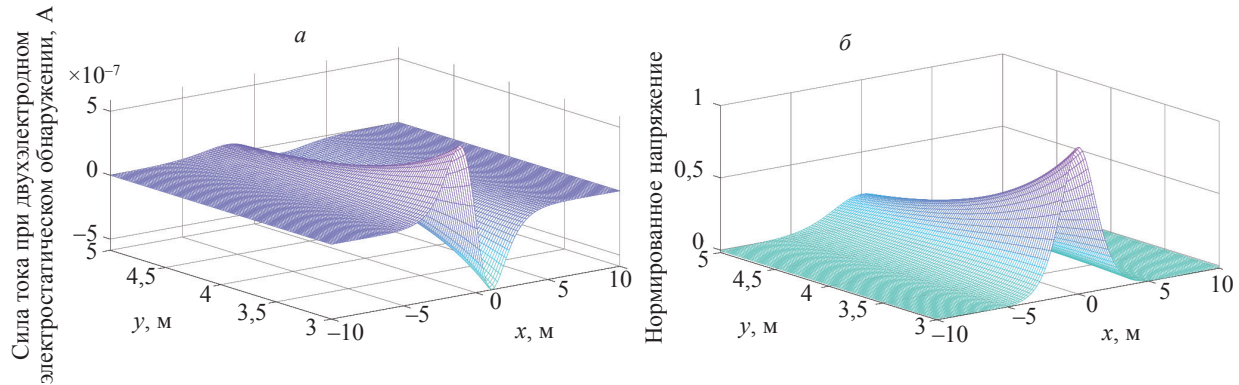


Рис. 7. Кривая влияния расстояние до объекта  $y$  на контроль с двумя электродами: кривая влияния тока (а); кривая влияния нормированного напряжения (б).

#### б) Влияние интервала $d$ между двумя электродами на эффективность обнаружения

Интервал между двумя электродами влияет на амплитуду тока обнаружения, разности потенциалов, расстояние обнаружения и форму сигнала. При анализе интервала  $d$  между двумя электродами было задано  $y = 5$  м, а оставшиеся предположения остались неизменными. Было предложено, что  $d$  имеет три значения: 1, 2 и 3 м, которые подставляются в Matlab для расчета вместе с формулами (25) и (26).

Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 8.

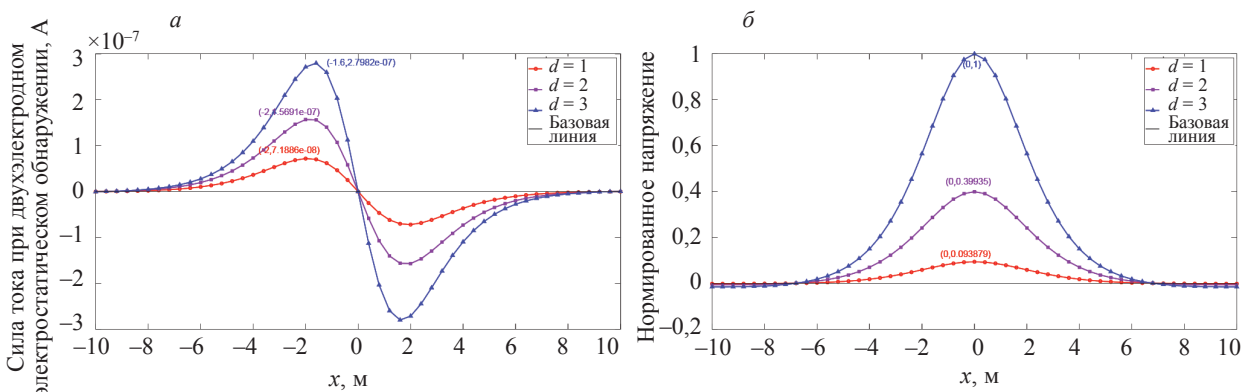


Рис. 8. Форма сигнала тока при двухэлектродном электростатическом обнаружении: форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Из рис. 8 видно, что пиковое значение тока и разности потенциалов увеличивается с увеличением интервала между двумя электродами, поэтому увеличение интервала между двумя электродами приводит к увеличению расстояния обнаружения.

На рис. 9 показано влияние интервала между двумя электродами на ток обнаружения и разность потенциалов индукционного электрода соответственно, когда горизонтальное расстояние между заряженной мишенью и детектирующим электродом составляет от  $-10 \sim 10$  м и интервал между двумя электродами —  $1 \sim 3$  м.

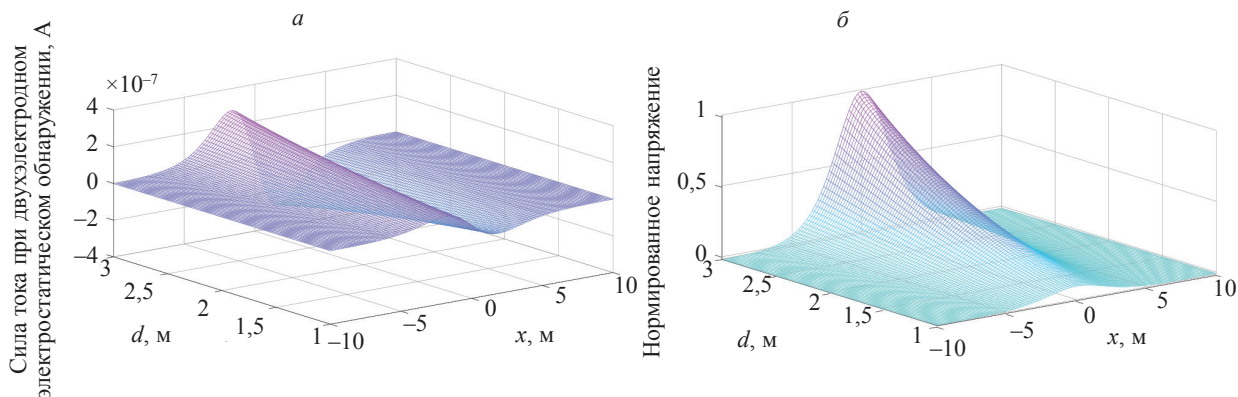


Рис. 9. Кривая влияния интервала  $d$  при двухэлектродном электростатическом обнаружении: кривая влияния тока (а); кривая влияния нормированного напряжения (б).

**в) Влияние  $Q, v, S$  на эффективность обнаружения**

Если предположить, что исходный график показан на рис. 5, то при увеличении  $S$  в 10 раз ( $S = 0,2 \text{ м}^2$ ), результирующая форма сигнала при двухэлектродном электростатическом обнаружении показана на рис. 10.

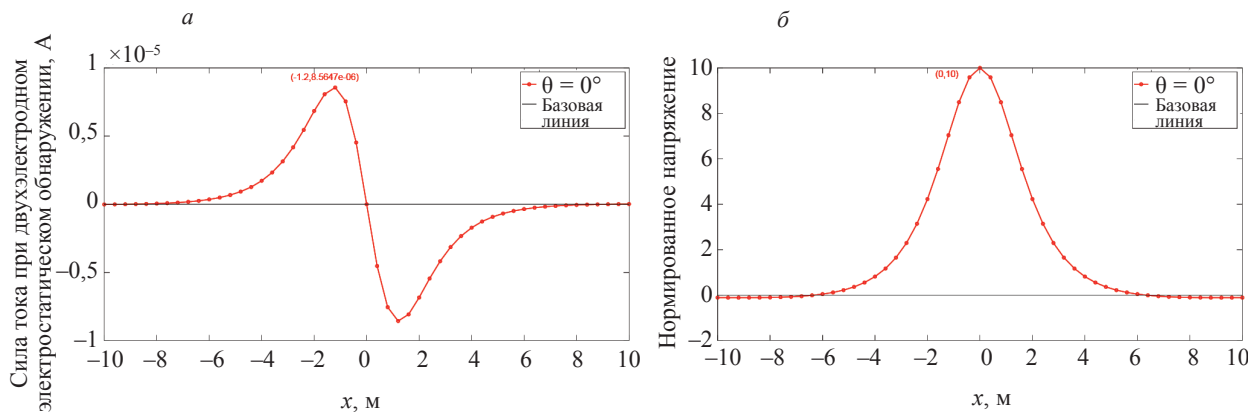


Рис. 10. Форма сигнала при двухэлектродном электростатическом обнаружении, когда  $S = 0,2 \text{ м}^2$ : форма сигнала тока (а); форма сигнала нормированного напряжения (б).

Сравнивая рис. 5 и 10, можно заметить значительное изменение в максимальных значениях величин. Объединяя формулы (25) и (26), несложно увидеть, что когда что-либо из  $Q, v, S$  увеличивается в  $n$  раз, амплитуда тока обнаружения и разности потенциалов также увеличивается в  $n$  раз. Следовательно, можно сделать вывод, что изменение  $Q, v$  и  $S$  пропорционально изменению тока обнаружения и разности потенциалов.

**г) Результаты математического моделирования**

На основе анализа моделирования можно сделать вывод, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения уменьшается с увеличением расстояния до объекта, в то время как оно увеличивается с увеличением интервала между двумя электродами.

Сравнивая влияние расстояния до объекта и интервала между двумя электродами на эффективность обнаружения двух электродов на рис. 7 и рис. 9, можно сделать вывод, что расстояние до объекта оказывает большее влияние на эффективность обнаружения, чем интервал между двумя электродами.

При сравнении рис. 5 и 10 и объединении формул (25) и (26) для анализа влияния  $Q, v, S$  и  $d$  на эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения видно, что  $Q, v, S$  пропорциональны амплитуде тока обнаружения, а возрастание всех трех величин приводит к увеличению тока обнаружения,  $Q$  и  $d$  пропорциональны амплитуде разности потенциалов и их увеличение приводит к увеличению разности потенциалов.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее проверяется точность разработанной системы и математических моделей. В работах [11] и [12] тестировались одноэлектродный и двухэлектродный модули электростатического обнаружения соответственно. Исследовательская система включает в себя модуль электростатического обнаружения, блок имитатора заряженного объекта и систему сбора данных [11]. Сравнивая теоретическую форму сигнала при моделировании и экспериментальную форму сигнала в данном исследовании, можно проверить точность созданной математической модели (рис. 11).

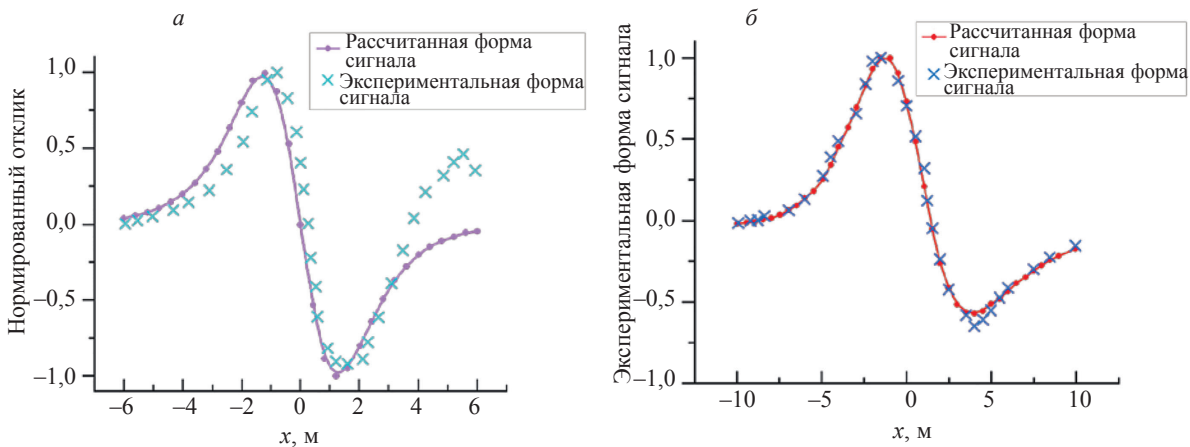


Рис. 11. Сравнение формы выходного сигнала модуля электростатического обнаружения: сравнение формы волны выходного сигнала при использовании одного электрода (а); сравнение формы волны выходного сигнала при использовании двух электродов (б).

После того, как нормируется выходной сигнал, из рис. 11 можно увидеть, что форма контролируемого выходного сигнала модулей электростатического обнаружения при использовании одного и двух электродов находится в хорошем согласии с теоретической рассчитываемой формой сигнала. Модель системы электростатической индукции и математическая модель, предложенные в данной статье, являются достаточно приемлемыми и могут быть использованы для дальнейших исследований.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается комплексная система электростатической индукции, разрабатывается модель системы и математическая модель тока и разности потенциалов при двухэлектродном электростатическом обнаружении. Влияние различных факторов в системах электростатической индукции на эффективность обнаружения получено с помощью компьютерного моделирования.

1. Создав математические модели для одноэлектродного и двухэлектродного электростатического обнаружения и проведя компьютерный модельный анализ, было установлено, что эффективность двухэлектродного электростатического обнаружения значительно выше, чем эффективность одноэлектродного электростатического обнаружения. Дальнейший анализ привел к упрощению и определению оптимальной модели системы двухэлектродного электростатического обнаружения и математической модели

2. Анализируя упрощенную математическую модель, становится ясно, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения тесно связано с факторами, присущими системе электростатической индукции. Дальнейший анализ результатов моделирования показал, что по мере увеличения интервала между двумя электродами и площади электродной пластины (т.е. заряда объекта и относительной скорости движения) расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения, очевидно, увеличивается. И наоборот, при увеличении расстояния до объекта расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения заметно уменьшается.

3. Путем анализа результатов моделирования было установлено, что расстояние двухэлектродного электростатического обнаружения связано с расстоянием до объекта, интервалом

между двумя электродами и площадью электродной пластины (зарядом объекта и относительной скоростью движения). В результате сравнительного анализа ряда условий было установлено, что расстояние до объекта оказывает большее влияние на эффективность электростатического обнаружения двухэлектродной системы, чем интервал между двумя электродами на эффективность обнаружения, а эти два фактора оказывают гораздо большее влияние, чем площадь электродной пластины (заряд объекта и относительная скорость движения). Поэтому на практике следует уделять особое внимание разработке и оптимизации расстояния до объекта и интервала между двумя электродами.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы хотели бы поблагодарить Научный Фонд для Постдоков Китая (№ гранта 2021M701713), Цзянсускую Программу Финансирования Выдающихся Талантов Постдокторантуры (№ гранта 2022ZB245), Национальный Фонд Естественных Наук Китая (№ гранта 52201399) и 2021 Открытый проект Фонда науки и технологий по проекту лаборатории электромеханического динамического управления (№ гранта 212-C-J-F-QT-2022-0020) за обеспечение финансирования для проведения экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorlov M.I., Strogonov A.V., Vinokurov A.A. Benchmarking the Reliability of the Consignments of Semiconductor Articles Using Electrostatic Discharges // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 455—461.
2. Song C.L., Teongsan Y. Effective Electrostatic Discharge detection in equipment via EMI // Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. 2008. V. 1. P. 1—4.
3. Dong Wang, Bo Xiong. Simulation Analysis of Electrostatic Field Detection of Moving Target // Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University. 2017. V. 32. No. 4. P. 411—415.
4. Fisher J., Hoole P.R., Pirapaharan K. et al. Pre-Lightning Strikes and Aircraft Electrostatics // Matec Web of Conferences. 2017. V. 87.
5. Kobayashi T., Oyama S., Makimoto N. et al. An electrostatic field sensor operated by self-excited vibration of MEMS-based self-sensitive piezoelectric microcantilevers // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 198. P. 87—90.
6. Noras M.A., Ramsey S.P., Rhoades B.B. Projectile detection using quasi-electrostatic field sensor array // Journal of Electrostatics. 2013. V. 71 (3). P. 220—223.
7. Trinks H. Electric field detection and ranging of aircraft // IEEE on Aerospace and Electric System. 1982. V. 3. P. 268—273.
8. Kimoto A., Ichinose Y., Shida K. A new sensing method using contact voltage for material discrimination // Sensors and Actuators A: Physical. 2009. V. 149. No. 1. P. 1—6.
9. Kurita K., Morinaga S. Noncontact Detection of Movements of Standing Up From and Sitting Down on a Chair Using Electrostatic Induction // IEEE Sensors Journal. 2019. V. 19 (19). P. 8934—8939.
10. Yinlin Li, Zhanzhong Cui, Yuxian Bai, Jusheng Shi. Charge-Inducing Electrostatic Fuze Detecting Technology // Journal of Beijing Institute of Technology. 1999. (S1). P. 3—5.
11. Weixin Li, Haidong Wu, Yuelong Liu, Haitao Wang. Research on Energy Loss of Fuze Setting System Based on Magnetic Resonant Coupling in Complex Environment // Journal of Test and Measurement Technology. 2016. V. 30 (04). P. 341—346.
12. Liqing Fang, Kai Chen, Hongkai Wang, Lei Zhang. Application of Passive Non-Contact Electrostatic Detection in Composite Fuze // Ordnance Industry Automation. 2012. V. 31 (12). P. 85—87.
13. Bo Xiong, Yunlong Dong, Dong Wang Weixin, Li. Analysis of Main Influence Factors on Electrostatic Fuse Detection // Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University. 2019. V. 34 (06). P. 465—469.
14. Yanxu Li, Lixin Xu. Study of a Novel Electrostatic Detection Sensor // Applied Mechanics & Materials. 2012. V. 110—116. P. 5476—5482.
15. Shiryayeva S.O., Grigor'ev A.I. On the stability of a bending mode of a charged jet of viscous dielectric liquid with the ultimate electroconductivity in a collinear electric field // Surface Engineering & Applied Electrochemistry. 2011.
16. Dong Wang, Bo Xiong, Weixin Li. Simulation Analysis of Influencing Factors of Electrostatic Detection // Journal of Ordnance Equipment Engineering. 2017. No. 12. P. 272—277.