

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ДУГИ УСТАНОВКИ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

И.М. ЖАББАРОВ, аспирант, А.В. ЮДИН, д-р техн. наук

Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53,  
e-mail: JudinAV@mail.ru

© Жаббаров И.М., Юдин А.В., 2021

В статье рассмотрена проблема электромагнитной совместимости датчиков для мониторинга параметров дуги плазматрона. Произведен краткий анализ публикаций о причинах помех и способах борьбы с ними. Проанализировано влияние тока дуги плазматрона на токоизмерительный датчик и рассчитана величина наводимой электродвижущей силы (ЭДС). Проведен натурный эксперимент с измерением величины наводимой ЭДС при помощи осциллографа. Выработаны рекомендации по улучшению условий электромагнитной совместимости.

*Ключевые слова:* плазматрон, датчик, помеха, источник питания, электромагнитная совместимость, синтез углеродных нанотрубок.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-82-90**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для мониторинга параметров и состояния установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом, а также автоматизации происходящих в ней процессов необходимо применять множество различных датчиков. В основном применяются датчики тока плазматрона, термопары с преобразователями сигнала из аналоговой формы в цифровую, вакуумные датчики давления, датчики избыточного давления в камере и т.д. От стабильности и точности работы каждого датчика зависит точность регулирования параметров установки. Для обеспечения достоверности информации с датчиков и бесперебойной передачи сигнала на управляющий контроллер важно учитывать чувствительность измерительных цепей к внешнему воздействию электромагнитных полей, а также наличие помех в цепях питания. В случае аналоговых датчиков появляется шум в измеренном сигнале, а в случае использования датчиков с цифровым выходом передача сигнала может совсем прерваться. Плазма и блок питания плазматрона являются источниками сильного электромагнитного излучения, величина которого зависит от мощности установки и условий распространения.

### **АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С НИМИ**

Проблеме влияния электромагнитных помех на датчики и методам борьбы с ними в последнее время уделяют много внимания. В статье [1] описываются виды помех и способы борьбы с ними. Авторы разделили все помехи в автоматизированных системах на виды:

- помехи, возникающие от сети электроснабжения;
- молния и атмосферное электричество;
- влияние статического электричества;
- помехи, возникающие через индуктивные связи;
- электромагнитные помехи;
- помехи, возникающие от неправильно проведенных заземлений [1].

Наибольшее влияние на систему промышленной автоматики оказывают помехи от сети электроснабжения:

- с фоном частотой 50 Гц;
- выбросы напряжения из-за разряда молнии;
- кратковременные затухающие колебания при переключении индуктивной нагрузки [1].

Один из методов борьбы с помехами – правильное конструирование систем автоматизации. К нему относятся анализ технических требований к условиям работы, уменьшение ширины полосы пропускания аналоговых модулей, применение гальванической развязки (для уменьшения влияния кондуктивных помех), использование коротких линий для передачи сигнала и питания датчиков, применение датчиков с цифровым интерфейсом.

В статье [2] рассматриваются методы повышения устойчивости датчиков к помехам, а также обеспечение электромагнитной совместимости во время их работы. Авторы публикации предлагают бороться с помехами на этапе разработки датчиков.

Основные методы борьбы с помехами, влияющими на датчики:

- анализ среды эксплуатации оборудования для установления влияния электромагнитных полей;
- ведение статистики сбоев работы датчиков и оборудования;
- определение типа помехи (индуктивная, кондуктивная или емкостная) и ее источника;
- правильное зонирование помещения с оборудованием;
- размещение кабельных связей помещения на отдельном (кабельном) полуэтаже.

В совокупности данные решения помогут уменьшить влияние помех на работу датчиков и оборудования в целом, а также повысить стабильность работы устройств.

В статье [3] рассматриваются способы решения проблем с электромагнитной совместимостью, создание блока электромагнитной совместимости. Основными способами защиты приборов от помех и перенапряжений являются использование фильтров низких частот и применение полупроводниковых ограничителей перенапряжения – варисторов и стабилитронов. Однако эти способы позволяют защитить устройства только от кондуктивных помех.

В статье [5] авторы разделяют воздействия на датчики в автоматизированной системе на виды:

- воздействие через кондуктивные связи;
- влияние неэквипотенциальности «земли»;
- наводки через взаимную индуктивность;
- наводки через емкостные связи;
- высокочастотные электромагнитные наводки [5].

Кондуктивные погрешности при передаче сигнала могут быть вызваны падением напряжения на участке провода, который является общим для сигнала и нагрузки. Для решения подобных проблем авторы предлагают подключать «землю» источника сигнала к «земле» приемника отдельным кабелем. Не стоит использовать «землю» сигнального провода в качестве цепи питания [5].

Если рядом с сигнальным проводом проходит электрическая цепь, по которой протекает ток, то вследствие явления электромагнитной индукции на сигнальной линии будут наводиться помехи. Данное явление называется индуктивной помехой. Для снижения эффекта авторы статьи предлагают располагать сигнальный провод максимально близко к «земле» и использовать идеальный источник тока. На постоянном токе индуктивная помеха отсутствует, а на переменном – увеличивается с ростом частоты тока.

Емкостная помеха возникает на паразитной емкости между проводниками и определяется величиной внутреннего сопротивления источника сигнала. Для устранения помехи авторы предлагают передавать сигнал с помощью идеального источника напряжения.

Чтобы повысить степень защищенности сигнала, следует производить экранирование сигнальных проводов, применять параллельно соединенные витые пары. При этом экран должен быть подключен к «земле» либо источника сигнала, либо приемника, поскольку по экрану будет протекать ток [5].

Все эти рекомендации необходимо учитывать и при проектировании системы управления установкой синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом.

### **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОКА ДУГИ ПЛАЗМОТРОНА НА ДАТЧИКИ И РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ НАВОДИМОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ (ЭДС)**

Внедрение датчиков в состав установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом и их испытания происходили поэтапно. Одним из основных рабочих параметров установки является ток плазмотрона. Обычно в качестве датчика тока в сварочных аппаратах и источниках питания для плазмотрона используется токоизмерительный шунт. Однако у данного вида измерения имеются недостатки: отсутствие гальванической развязки, увеличение погрешности из-за нагрева шунта протекающими высокочастотными токами, а также поверхностный эффект. В связи с этим для измерения использовался датчик тока на эффекте Холла ACS758 (с диапазоном измеряемого тока до 100 А). Достоинство датчиков на эффекте Холла заключается в их способности измерять постоянный, переменный и импульсные токи.

Питание датчика осуществляется от внешнего источника. Датчик подключается в разрыв цепи, в которой производится измерение тока. На цепи питания установлены цепи защиты от бросков напряжения в виде TVS-диода. Конструкция интегрального датчика показана на рис. 1.

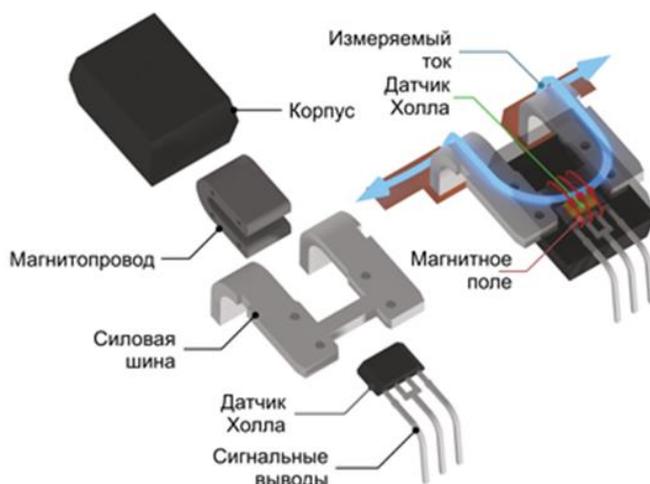


Рис. 1. Интегральный датчик тока на эффекте Холла

При применении датчика для измерения тока от лабораторного источника тока проблем с измерениями не возникало. Попытка измерения тока от блока питания плазматрона привела к выходу датчика из строя. Величина выходного тока плазматрона при этом не была превышена относительно рабочего диапазона токов датчика. Кроме того, вышел из строя амперметр, подключенный к датчику тока. Источник плазмы работал без внешнего экрана, датчик тоже не был экранирован.

Для снижения уровня помех было проведено экранирование сигнальных и питающих проводов. Плазмотрон поместили в реакционную камеру из нержавеющей стали. Дальнейшие испытания проводились с использованием датчика тока на эффекте Холла, конструктивно представляющего собой моноблок, содержащий магнитопровод в виде кольца и интегрированный усилитель сигнала (рис. 2).

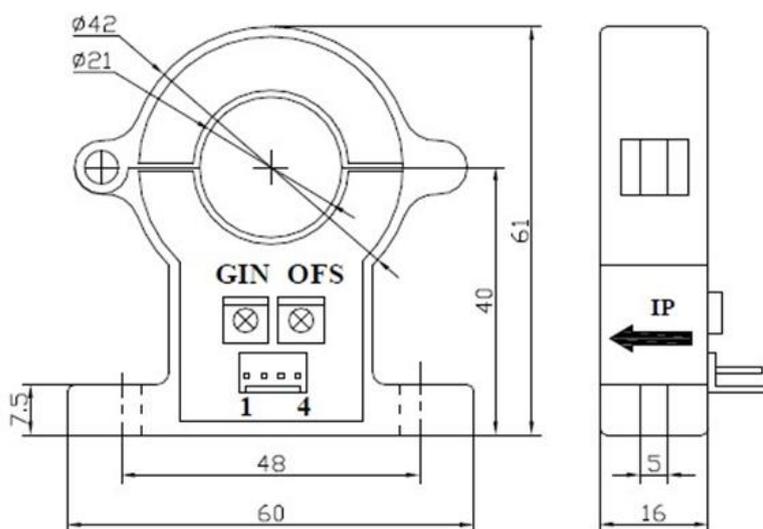


Рис. 2. Датчик тока на эффекте Холла с магнитопроводом

Основное достоинство такой конструкции заключается в увеличении расстояния от проводника с током до встроенного усилителя. В результате принятых мер датчик не выходит из строя, но его показания значительно отличаются от уставки по току блока питания плазматрона, и это говорит о том, что уровень наведенных помех все еще очень высок.

Для оценки уровня электромагнитных помех произведем теоретические расчеты магнитного поля проводника с током, величины наводимой ЭДС в датчике тока, расположенном на питающем проводе плазматрона.

Силовые линии магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током  $I$ , представляют собой кольцевые линии. При этом для точки, расположенной на расстоянии  $R$  от оси проводника, модуль напряженности

$$H = \frac{I}{2\pi R} ,$$

а направление, определяемое по правилу правого винта, совпадает с направлением касательной. Однако данная формула не очень удобна для решения частной задачи анализа поля, созданного системой  $n$  параллельных проводников, расположенных по

определенному радиусу. Рассмотрим методику анализа напряженности магнитного поля для объекта подобного типа.

В общем случае напряженность магнитного поля, созданного током  $I$ , протекающим по направленному элементу проводника  $d\vec{s}$ , расположенного в некоторой точке пространства (рис. 3), определяется с помощью закона Био – Савара – Лапласа:

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I}{R^3} [d\vec{s} \vec{R}],$$

где  $d\vec{H}$  – напряженность поля;  $\vec{R}$  – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника в эту точку пространства;  $R$  – модуль радиус-вектора.

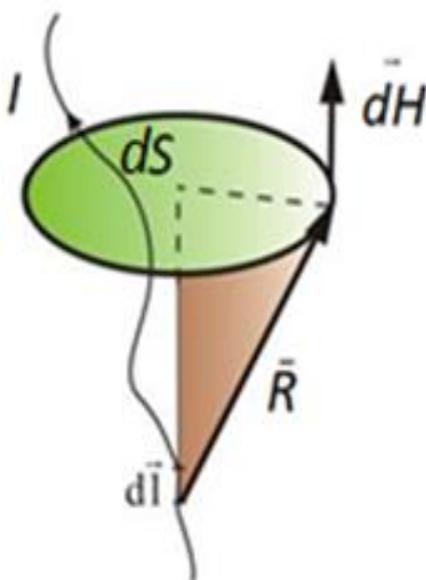


Рис. 3. Магнитное поле и напряженность вокруг проводника с током

Выразим векторные величины через их компоненты:

$$d\vec{H} = dH_x \vec{i} + dH_y \vec{j} + dH_z \vec{k};$$

$$d\vec{s} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k};$$

$$\vec{R} = R_x \vec{i} + R_y \vec{j} + R_z \vec{k}.$$

Распишем векторное произведение через компоненты векторов. Для этого составим определитель и решим его:

$$\begin{aligned} [d\vec{s} \vec{R}] &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx & dy & dz \\ R_x & R_y & R_z \end{vmatrix} = \vec{i} \begin{vmatrix} dy & dz \\ R_y & R_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} dx & dz \\ R_x & R_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} dx & dy \\ R_x & R_y \end{vmatrix} = \\ &= \vec{i} (R_z dy - R_y dz) - \vec{j} (R_z dx - R_x dz) + \vec{k} (R_y dx - R_x dy). \end{aligned}$$

Для системы проводников, ориентированной в направлении одной из осей координат (например, оси аппликат) имеем:  $dx = 0$ ,  $dy = 0$ .

В соответствии с этим для векторного произведения и вектора напряженности получим:

$$\begin{aligned} [d\bar{s} \ \bar{R}] &= (R_x \bar{j} - R_y \bar{i}) dz; \\ d\bar{H} &= \frac{I}{4\pi R^3} (R_x \bar{j} - R_y \bar{i}) dz. \end{aligned}$$

Будем рассматривать напряженность поля  $H$ , созданную элементом единичной длины, т.е. при  $dz = 1$ . В этом случае после интегрирования для всего проводника бесконечной длины получим для напряженности поля в точке  $Q(x_2, y_2)$ , созданной элементом тока, расположенным в точке  $P(x_1, y_1)$ :

$$\bar{H} = \frac{I(- (y_2 - y_1) \bar{i} + (x_2 - x_1) \bar{j})}{4\pi \sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{3/2}}}.$$

Определим поле напряженностей в заданной области  $D$ , ограниченной равномерно распределенными по радиусу  $n$  параллельными проводниками. Координаты точек расположения проводников  $P_k(x_k, y_k)$ , где  $k = 0, 1, \dots, n - 1$ , определяются с помощью формулы Муавра:

$$x_k = \operatorname{Re} \left( e^{j \frac{2\pi k}{n}} \right); \quad y_k = \operatorname{Im} \left( e^{j \frac{2\pi k}{n}} \right).$$

Для исследования распределения напряженности поля в пространстве, заданном прямоугольной сеткой, разработана функция  $hpset(I, P, X, Y)$ . Первый и второй параметры этой функции задают величину тока и координаты точки расположения прямолинейного проводника с током. Третий и четвертый параметры  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$  определяют абсциссы и ординаты сетки. Вычисления производят последовательно для каждой точки сетки. Результатом является многомерный массив, содержащий две прямоугольные матрицы: матрицу проекций векторов напряженности на ось абсцисс и матрицу проекций векторов напряженности на ось ординат. На основе этой функции проводится расчет напряженности в пространстве между двумя проводниками. Амплитуды напряженностей определяются в результате геометрического суммирования рассчитанных компонентов напряженности.

В результате расчета распределения напряженности магнитного поля между проводниками при токе плазмотрона 50 А получаем диаграмму (рис. 4).

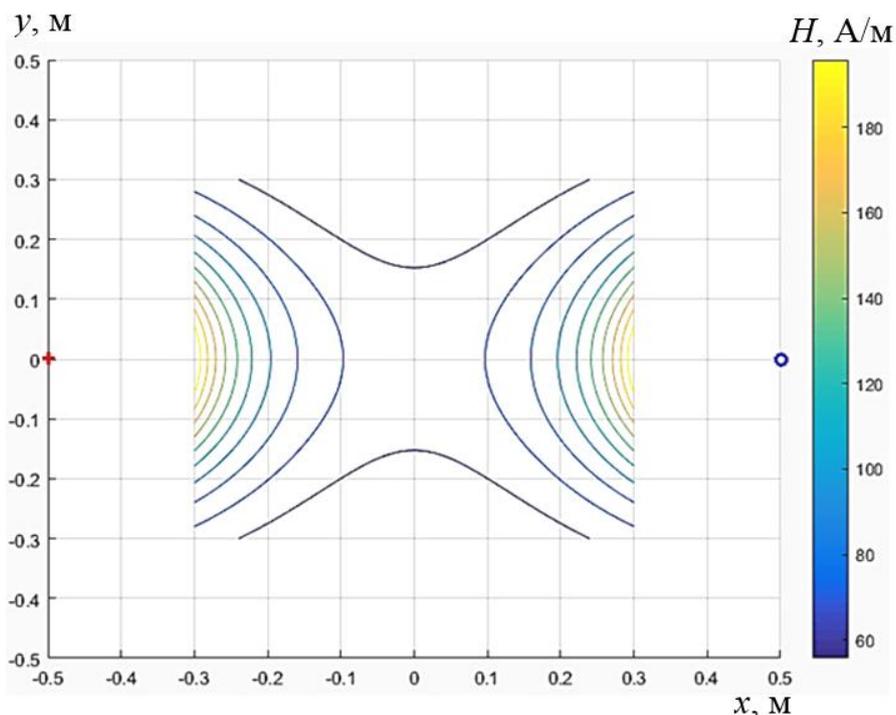


Рис. 4. Диаграмма распространения напряженности магнитного поля

Для расчета индукции достаточно умножить значение напряженности на значение магнитной проницаемости вакуума, считая относительную магнитную проницаемость окружающей среды равной единице.

Для расчета наведенной ЭДС воспользуемся формулой [6, 7]

$$E = 4fSBw,$$

где  $f$  – частота тока в проводнике, Гц;  
 $S$  – площадь поперечного сечения датчика тока, м<sup>2</sup>;  
 $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  
 $w$  – число витков псевдоторичной обмотки.

Расчетная величина наводимой ЭДС составляет 400 мВ. Расчет производится при частоте тока в проводнике 20 кГц, расстояние от плазматрона до датчика тока составляет 0,5 м, площадь петли измерительной цепи датчика тока задана равной 0,003 м<sup>2</sup>.

### ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для сопоставления расчетных данных с практическими был проведен эксперимент. К щупам осциллографа *Rigol DS1052E* подключили антенну в виде петли из медного провода (длина – 20 см; поперечное сечение – 6 мм<sup>2</sup>). Антенна от осциллографа расположили на расстоянии 1 м от работающего плазматрона и на расстоянии 0,5 м от источника питания. Провод от источника питания до плазматрона расположили горизонтально. Ток источника питания выставили на 25 А, после чего запустили плазматрон. Осциллограф через петлю-антенну фиксировал пульсации электромагнитного поля с частотой 200 кГц и амплитудой 600 мВ. На рис. 5 приведен снимок показаний осциллографа.

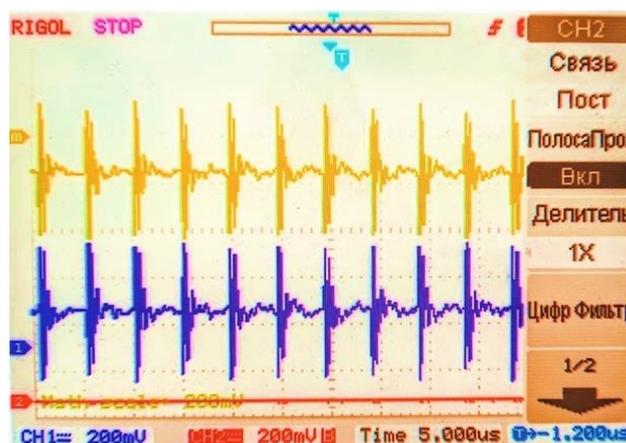


Рис. 5. Показания осциллографа во время работы плазмотрона

Существует разница между измеренной величиной, наведенной ЭДС (600 мВ), и расчетной (400 мВ), что может быть объяснено наличием дополнительных контуров в цепях осциллографа. Как и ожидалось, при увеличении расстояния от антенны до плазмотрона наведенная ЭДС уменьшается. В целом можно сделать вывод о возможности применения данной методики в дальнейших исследованиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве мер по снижению влияния электромагнитного поля на датчики было проведено экранирование столба дуги в камере из нержавеющей стали, что позволило снизить амплитуду наводимых пульсаций до 400 мВ. Применение дополнительных фильтров в источнике питания датчика тока не принесло результата. Наиболее эффективным вариантом представляется использование внешнего аккумуляторного питания для датчиков и всей измерительной электроники. Это позволит избавиться от помех, наводимых по цепям питания устройств (кондуктивных). Кроме того, на уменьшение величины помех оказывает значительное влияние уменьшение длины питающих проводов от аккумулятора до датчика, поскольку уменьшается площадь для воздействия магнитного поля. Источник питания плазмотрона также необходимо заземлять.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жумаев О.А., Шермурадова М.Ф., Бабаев А.А. Защита от помех технических средств автоматизации систем управления // *Наука, техника и образование*. 2018. № 7 (48). С. 36–40.
2. Сарылов О.В. Методика обеспечения качества функционирования датчиков давления в условиях электромагнитных помех на всех этапах жизненного цикла // *The Scientific Heritage*. 2020. № 43. С. 33–37.
3. Захаров А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости // *Компоненты и технологии*. 2006. № 5. С. 124–129.
4. Данилов А. Современные промышленные датчики тока // *Современная электроника*. 2004. № 10. С. 26–35.
5. Денисенко В., Халявко А. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // *Современные технологии автоматизации*. 2001. № 1. С. 68–75.
6. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Альянс, 2008. 400 с.

7. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: РадиоСофт, 2005. 320 с.

**Для цитирования:** Жаббаров И.М., Юдин А.В. Особенности применения датчиков для мониторинга параметров дуги установки синтеза углеродных нанотрубок плазмохимическим методом // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 82–90.

## **APPLICATION FEATURES OF THE SENSORS FOR MONITORING THE ARC PARAMETERS OF THE CARBON NANOTUBE SYNTHESIS PLANT BY THE PLASMA CHEMICAL METHOD**

I.M. ZHABBAROV, postgraduate, A.V. YUDIN, Dr. Sc.

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, 53, Pushkin st.,  
152934, Yaroslavl region, Rybinsk, Russian Federation, e-mail: JudinAV@mail.ru

The article devoted to the problem of electromagnetic compatibility of sensors for monitoring the parameters of the plasma torch arc. A brief review of publications with the causes of interference and ways to eliminate them is made. The influence of the arc current of the plasma torch on the current measuring sensor is analyzed and the magnitude of the induced EMF is calculated. A full-scale experiment was carried out with the measurement of the induced EMF using an oscilloscope. Recommendations for improving the conditions of electromagnetic compatibility have been developed.

*Keywords:* plasma torch, sensor, distortion, power source, electromagnetic compatibility, synthesis carbon nanotubes.

### **REFERENCES**

1. Jumaev O.A., Shermuradova M.F., Babayev A.A. Protection from interference of technical means of automation of control systems. *Nauka, tehnika i obrazovanie*. 2018. No. 7 (48), pp. 36–40. (In Russian).
2. Sarylov O.V. Quality operation methodology for pressure sensors under conditions of electromagnetic interference at all stages of the life cycle. *The Scientific Heritage*. 2020. No. 43, pp. 33–37. (In Russian).
3. Zakharov A. Protection of industrial devices in accordance with the norms of electromagnetic compatibility. *Komponenty i tekhnologii*. 2006. No. 5, pp. 124–129. (In Russian).
4. Danilov A. Modern industrial current sensors. *Sovremennaya elektronika*. 2004. No. 10, pp. 26–35. (In Russian).
5. Denisenko V., Khalyavko A. Protection against interference of sensors and connecting wires of industrial automation systems. *Sovremennye tekhnologii avtomatizacii*. 2001. No. 1, pp. 68–75. (In Russian).
6. Belopolsky I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. Raschet transformatorov i drossiley maloy moshchnosti [Calculation of low-power transformers and chokes]. Moscow: AlyanS, 2008. 400 p.
7. Starodubtsev Yu.N. Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti [Theory and calculation of low power transformers]. Moscow: RadioSoft, 2005. 320 p.

Поступила в редакцию/received: 13.07.2021; после рецензирования/revised: 27.09.2021;  
принята/accepted: 01.10.2021