

РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЛЕТА МЕТАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ИНДУКЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Тропынин Игорь Владимирович (ivtroynin@vniief.ru), Давлетчин Дмитрий Зуфарович, Фадеев Владимир Юрьевич, Назаров Дмитрий Витальевич, Ошкин Игорь Владимирович, Жарков Сергей Викторович, Симаков Владимир Геннадьевич, Брагунец Вячеслав Алексеевич, Окинчиц Андрей Александрович, Шестаков Евгений Евгеньевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования регистрации пролета метаемого объекта с помощью датчика индукционного типа с оптическим выходом. Рассмотрена методика расчета и построена численная модель с учетом движения метаемого объекта в области чувствительности датчика. Проведена сравнительная оценка результатов расчёта с результатами экспериментальных исследований, полученных на нагружающей пневматической установке калибром 50 мм.

Ключевые слова: метаемый объект, индукционный датчик, катушка индуктивности, постоянный магнит, магнитное поле, оптический выход, передача сигнала, численное моделирование.

REGISTRATION OF THE FLIGHT OF THE THROWN OBJECT USING A COMBINED INDUCTION-OPTICAL SENSOR

Troynin Igor Vladimirovich, Davletchin Dmitriy Zufarovich, Fadeev Vladimir Yuryevich, Nazarov Dmitriy Vitalyevich, Oshkin Igor Vladimirovich, Jharkov Sergey Viktorovich, Simakov Vladimir Genadtevich, Bragunets Vyacheslav Alekseyevich, Okinchic Andrey Aleksandrovich, Shestakov Evgeny Yevgenyevich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents a theoretical and experimental study of registration of flight of a thrown object using an induction-type sensor with an optical output. The calculation method is considered and a numerical model is constructed taking into account the movement of the object being thrown in the sensor sensitivity region. Comparative evaluation on the calculation results was carried out with the results of experimental studies obtained at a loading pneumatic facility with the caliber of 50 mm.

Keywords: throwing object, induction sensor, inductance coil, permanent magnet, magnetic field, optical output, signal transmission numerical simulation.

Введение

Одним из ключевых моментов при обработке образцов ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ) является регистрация пролета метаемых объектов (МО) в заданных участках ствола. Это необходимо как для исследования внутрибаллистических параметров, так и для формирования сигнала синхронного запуска измерительной аппаратуры и системы автоматики специальных устройств (например, срабатывания затворов, герметично локализирующих отдельные сегменты ствола). Для этой цели могут быть использованы датчики контактного и некон-

тактного типа с последующей передачей сигнала регистрации по линиям передачи. Однако использование датчиков контактного типа при высоких скоростях пролета МО может привести к разрушению и отклонению МО от заданной траектории, что в свою очередь приведет к значительной рассинхронизации по времени. Чтобы минимизировать влияние процесса регистрации на характер и скорость пролета МО, как правило, применяют индукционные датчики неконтактного типа [1–5]. Датчики данного типа могут быть выполнены по генераторной схеме (в отличие от оптических и индуктивных), что позволяет исключить применение дополнительных цепей

питания и усиления, тем самым повысить надежность срабатывания устройств даже в условиях воздействия широкополосных электромагнитных помех.

В некоторых практических задачах требуется передать зарегистрированный сигнал на расстояния до 1 км, при этом электромагнитные помехи, возникающие при срабатывании высоковольтных электрофизических установок в момент свободного полета МО, могут вызвать формирование ложных сигналов регистрации, а в некоторых случаях и к потере полезного сигнала. Для реализации передачи сигнала на указанные расстояния и защиты измерительного тракта от электромагнитных помех оптимальной является передача сигнала по оптическим линиям.

Уровень мощности сигнала на выходе датчика значительно зависит от характеристик используемых материалов (удельной проводимости и магнитной проницаемости), особенно в его чувствительной области в момент пролета МО. С увеличением скорости пролета МО повышается частота генерируемого сигнала на выходе датчика. Это в свою очередь приводит к уменьшению глубины скин-слоя в материалах, росту амплитуды поверхностных токов и, как следствие, к существенному снижению амплитуды сигнала. В связи с этим при передаче сигнала на большие расстояния сложной задачей является обеспечение формирования достаточного уровня мощности сигнала на оптическом излучателе, включенного в цепь датчика, и передачи этой мощности по оптической линии без применения дополнительных схем питания и усиления.

Перечисленные факторы определяют сложность и актуальность задачи регистрации пролета МО неконтактными датчиками индукционного типа с оптическим выходом в образцах РАВ и передачи зарегистрированного сигнала на расстояния до 1 км.

Целью работы является разработка комбинированного индукционно-оптического датчика и совершенствование неконтактного метода регистрации МО.

Методика и результаты расчета датчика

В состав предлагаемого индукционного датчика (ИД) с оптическим выходом входят следующие основные функциональные элементы:

- катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником, генерирующая на выходе заданное напряжение холостого хода;
- постоянный магнит, возбуждающий в чувствительной области катушки стационарное магнитное поле высокой напряженности;
- оптический излучатель, преобразующий электрический сигнал с катушки в оптический.

Методика расчета геометрических размеров и выходных характеристик ИД состоит из двух этапов. На первом этапе рассматривается работа датчика в режиме холостого хода, на втором – режим с нагрузкой в виде излучателя.

На рис. 1,а приведена эквивалентная схема замещения ИД в режиме холостого хода.

Индуктивность L_k и полное сопротивление Z_k катушки в режиме холостого хода рассчитываются с помощью выражений:

$$L_k = \mu_0 \mu_{\text{серд}} S_e \frac{N_{\text{вит}}^2}{l_e}, \quad (1)$$

$$Z_k = \sqrt{(R_k)^2 + (2\pi f L_k)^2}, \quad (2)$$

где μ_0 и $\mu_{\text{серд}}$ – магнитная постоянная и относительная магнитная проницаемость материала сердечника, S_e – площадь сечения сердечника, l_e – длина средней линии сердечника, $N_{\text{вит}}$ – количество витков, R_k – активное удельное сопротивление катушки, f – частота генерируемого сигнала, $v_{\text{МО}}$ – скорость МО.

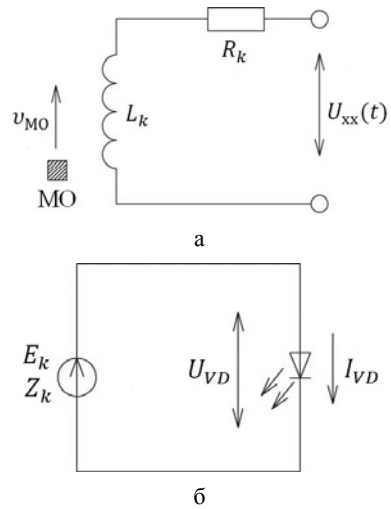


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения ИД: а – режим холостого хода, б – режим с нагрузкой

Для расчета индуцированного напряжения холостого хода $U_{xx}(t)$ на выходе катушки, вызванного изменением магнитного потока Φ при пролете МО, используются выражения [6, 7]:

$$\Phi = N_{\text{вит}} \int \mu_{rl} H dS, \quad (3)$$

$$U_{xx}(t) = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

При подключении оптического излучателя (нагрузки) в замкнутой цепи ($U_{xx} \approx E_k$) протекает ток (см. рис. 1,б), величина которого определяется по выражению:

$$I_{VD} = \frac{E_k - U_{VD}}{Z_k}. \quad (5)$$

Оптическая мощность на конце оптической линии определяется по выражению:

$$P_{\text{опт}} = 10^{\frac{K_{\text{ос}}}{10}} \cdot 0,001 \cdot P(I_{VD}), \quad (6)$$

где K_{oc} – коэффициент ослабления для оптического волокна, $P(I_{VD})$ – относительная мощность излучателя, зависящая от протекающего через него тока (задается в технических условиях на излучатель).

В качестве оптического излучателя используется светодиод, для которого относительная мощность $P(I_{VD})$ определяется по графику, представленному на рис. 2.

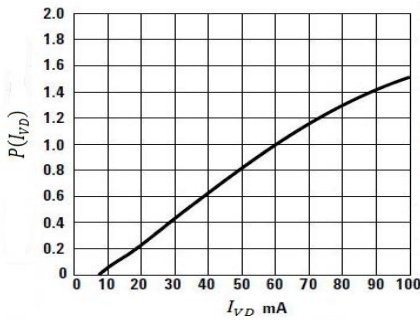


Рис. 2. График для определения относительной мощности $P(I_{VD})$ оптического излучателя

При расчете учитывалось, что коэффициент ослабления для оптического волокна K_{oc} составляет (-16) дБм.

На этом же этапе проводится рекурсия цикла разработки ИД до корректировки параметров катушки и выбора материалов с целью повышения амплитуды напряжения $U_{xx}(t)$ на выходе ИД для достижения требуемой мощности на конце оптической линии.

Модель ИД, используемая при моделировании, представлена на рис. 3.

В результате расчета получены следующие параметры ИД: отношение внешнего диаметра катушки к внутреннему – 1,5; отношение внешнего диаметра катушки к длине – 3,57. Постоянный магнит имеет форму сплошного цилиндра с соотношением диаметра к длине 1. В качестве сердечника выбран ферромагнитный стержень с соотношением диаметра к длине 1,4. Корпус ИД выполнен из стального полового цилиндра. При моделировании для имитации ударника МО использовалось стальное кольцо с соотношением

внешнего диаметра к внутреннему 1,06 и отношением внешнего диаметра к ширине 14,1. Расстояние от активной области датчика (катушки) до внешней границы пролета кольца составляло 3 мм. Для минимизации влияния скин-эффекта и увеличения напряженности магнитного поля в области пролета МО каркас катушки и магнита выполнены из фторопласта.

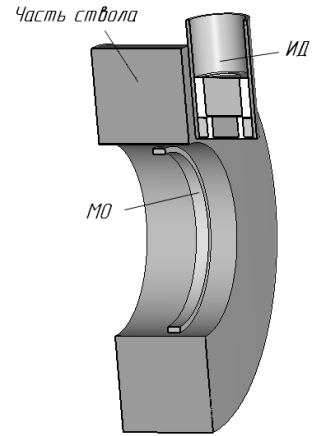


Рис. 3. Модель ИД для расчета

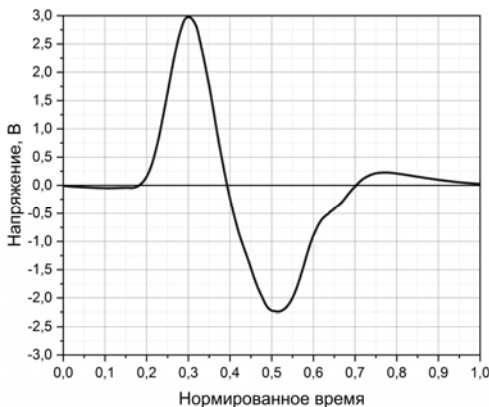
Временная и спектральная характеристики выходного напряжения в режиме холостого хода работы ИД при скорости МО $v_{МО} = 700$ м/с представлены на рис. 4, а, б соответственно. Применение прямого преобразования Фурье для $U_{xx}(t)$ позволило уточнить значение частоты f выходного напряжения при определении полного сопротивления катушки Z_k .

Результаты моделирования магнитного поля в отдельные моменты пролета МО приведены на рис. 5.

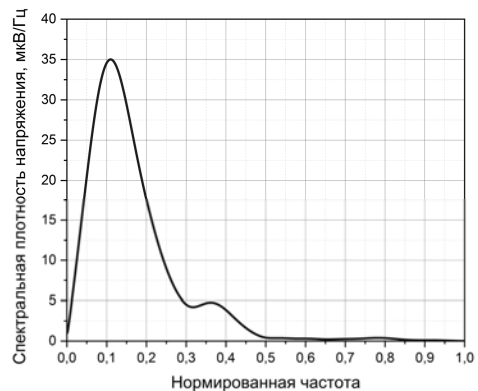
Используя схему рис. 1, б в режиме с нагрузкой при $E_k = 2,98$ В, $U_{VD} = 1,5$ В, $\frac{Z_k}{R_k} = 28,8$, получаем

ток $I_{VD} = 0,058$ А. На рис. 6 приведена временная характеристика тока, протекающего через оптический излучатель.

Тогда из рис. 2 при токе 58 мА относительная мощность составляет 0,98, а искомая оптическая мощность на конце оптической линии $P_{opt} = 26,4$ мкВт.



а



б

Рис. 4. Характеристики выходного напряжения в режиме холостого хода: а – временная, б – спектральная

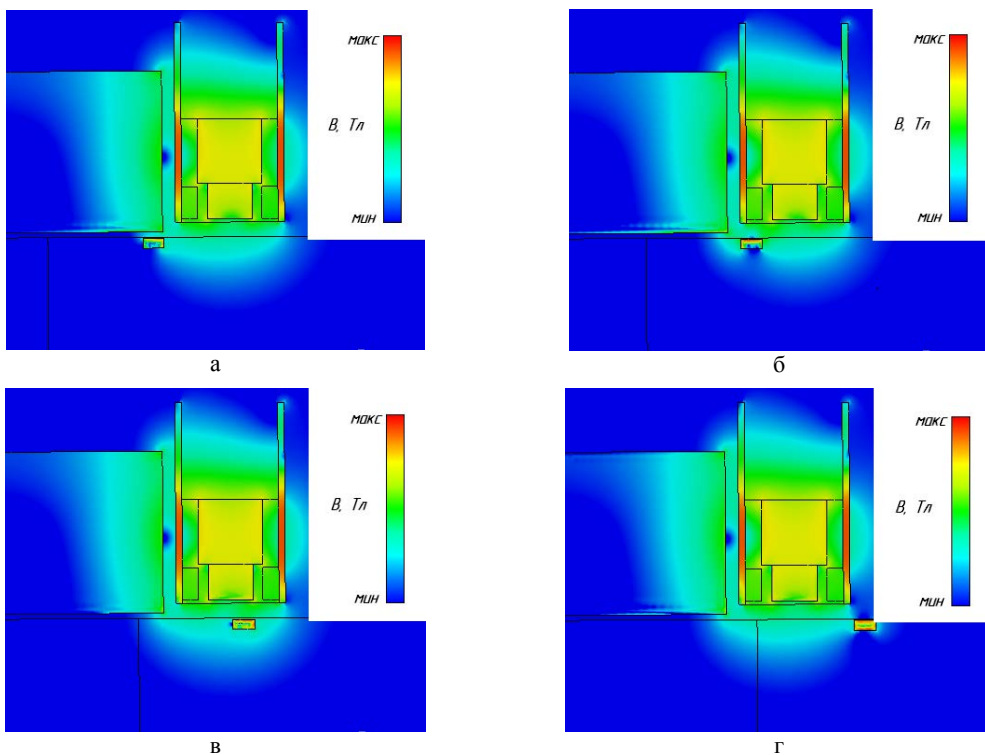


Рис. 5. Распределение магнитного поля в области ИД при пролете МО в виде стального кольца в отдельные моменты времени: а – $t_{\text{норм}} = 0,2$; б – $t_{\text{норм}} = 0,3$; в – $t_{\text{норм}} = 0,5$; г – $t_{\text{норм}} = 0,7$

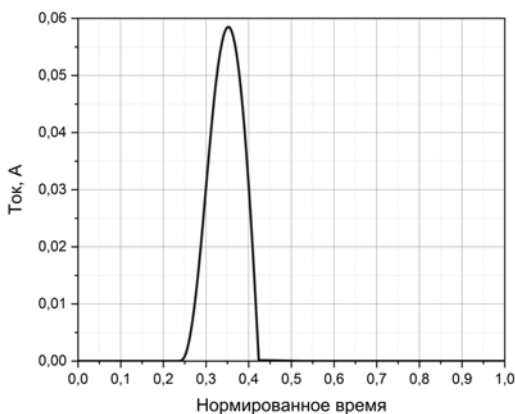


Рис. 6. Временная характеристика тока в режиме с нагрузкой

Постановка и результаты эксперимента

Для подтверждения результатов расчета был изготовлен ИД и проведены экспериментальные исследования.

При проведении эксперимента использовалась нагружающая пневматическая установка калибром 50 мм (НПУ-50), а МО был выполнен из полиэтилена. Для имитации ударника, аналогично численному моделированию, использовалось стальное кольцо с отношением внешнего диаметра к внутреннему 1,06 и отношением внешнего диаметра к ширине 14,1.

На рис. 7 приведен внешний вид МО с кольцом.

На рис. 8 приведено расположение ИД на мишенном блоке.



Рис. 7. Внешний вид МО из полиэтилена со стальным кольцом

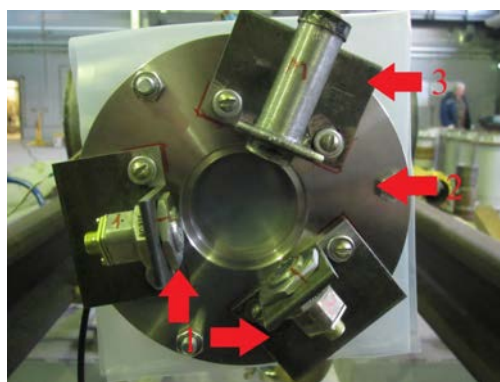


Рис. 8. Расположение ИД на мишенном блоке: 1 – дополнительные датчики, 2 – мишенный блок, 3 – индукционный датчик с оптическим выходом

Схема подключения измерительного оборудования приведена на рис. 9.

Сигнал, зарегистрированный на осциллографе, приведен на рис. 10.

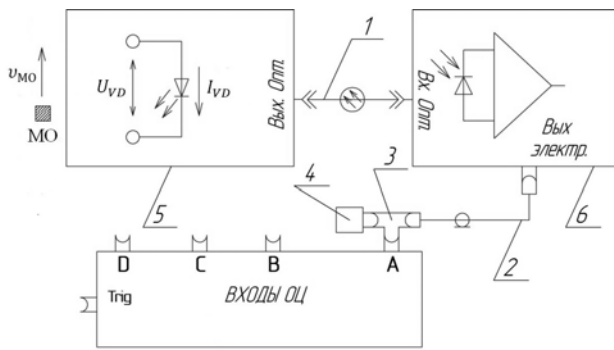


Рис. 9. Схема подключения измерительного оборудования: 1 – шнур оптический, 2 – кабель коаксиальный РК-50, 3 – тройник коаксиальный, 4 – терминатор 50 Ом, 5 – датчик индукционно-оптический, 6 – опто-электрический преобразователь

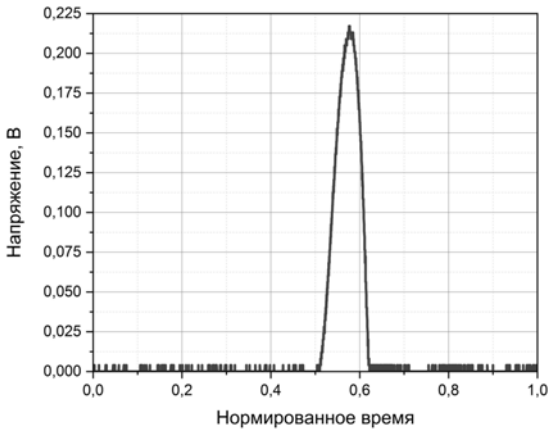


Рис. 10. Сигнал, зарегистрированный на осциллографе

Для определения скорости МО использовались датчики давления T2000. Скорость МО в эксперименте составляла $v_{МО, \text{экс}} = (696 \pm 5)$ м/с.

Экспериментальная оптическая мощность с выхода ИД рассчитывалась по формуле:

$$P_{\text{опт.экс}} = \frac{U_{\text{max}}}{K_{\text{пр}}} = \frac{0,218}{8500} = 25,7 \text{ мкВт}, \quad (7)$$

где $K_{\text{пр}} = 8,5 \frac{\text{мВ}}{\text{мкВт}} = 8500 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$ – коэффициент чувствительности оптического приемника.

Сравнительный анализ уровня оптической мощности показал хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правильность расчетной методики ИД с оптическим выходом.

Выводы

Разработан комбинированный индукционно-оптический датчик. Результаты расчета и их соответствие экспериментальным данным, полученным с использованием НПУ-50, подтверждают возможность регистрации момента пролета МО. Отсутствие дополнительных схем питания и усиления, наличие оптического выхода существенно повышают стойкость измерительной цепи к воздействию широкополосных электромагнитных помех. Возможность изменения габаритов датчика под заданный тип оптического излучателя позволяет проводить регистрацию пролета и измерение скорости МО со стволами разного калибра. Кроме того, развитый в работе неконтактный метод может найти широкое применение при измерении смещения МО от центра ствола при испытаниях опытных образцов РАВ.

Список литературы

1. Герасимов С. И., Герасимова Р. В., Ерофеев В. И., Зубанков А. В., Каныгин И. И., Кикеев В. А., Одзерихо И. А., Яненко Б. А. Способ запуска регистрирующих систем и измеритель средней скорости метаемого объекта // Вестник научно-технического развития. 2017. № 3. С. 22–29.
2. Федотов А. В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля: монография // Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. С. 176.
3. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества: монография // Под ред. академика Р. И. Ильяева, д.т.н. А. Л. Михайлова, д.ф.-м.н. М. В. Жерноклетова. М.: РАН, 2021. С. 484.
4. Пат. 2193207, РФ, МПК G 01 P 3/42 Датчик положения и скорости перемещения быстро движущихся тел / Кульпин В. И., Синяев С. В., Христенко Ю. Ф. // Бюллетень изобретений. 2002. № 32.
5. Пат. 2331891, РФ, МПК G 01 P 3/42 Датчик положения и скорости перемещения быстро движущихся тел / Барышев М. С., Ищенко А. Н., Федосов Ю. П. // Бюллетень изобретений. 2008. № 23.
6. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник. 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. С. 704.
7. Ошкин И. В., Быков А. Г., Троцюк К. В., Гетманец А. Н., Прудкой Н. А., Прозоров В. Б., Тихонова Е. А. Расчет проникновения электромагнитного поля в цилиндрический экран со щелью // Технологии ЭМС. 2019. № 34. С. 41–50.