

АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

**А. А. Трофимов¹, М. А. Полина², А. В. Гладков³,
Д. В. Токарев⁴, Т. Н. Попченкова⁵, С. А. Здобнов⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru, ⁶ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное развитие ракетно-космической техники, вооружения и военной техники, авиации, двигателестроения, изделий для атомной энергетики и т.п. во многом зависит от технического уровня использованных в них информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) подвижных многофункциональных комплексов. В специальной технике ИИУС эксплуатируется при воздействии большого количества дестабилизирующих факторов: ударов, вибраций, линейных ускорений, акустического шума, широкого диапазона воздействующих температур. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы метод образцовых мер, метод обратного преобразования введения точных и стабильных обратных преобразователей кода в перемещение, метод вспомогательных измерений, алгоритм функциональной обработки. *Результаты.* Проведена систематизация типовых структур и алгоритмов работы фотоэлектронных информационно-измерительных систем контроля параметров пространственного положения объектов (ФИИСП), предложена систематизация ФИИСП. Предложены основные принципы построения фотоэлектрических преобразователей. Разработана структурная схема, на основе которой возможно создание преобразователей определения пространственного положения для информационно-измерительных и управляющих систем.

Ключевые слова: фотоэлектронный преобразователь, чувствительный элемент, структурная схема, систематизация, дестабилизирующие факторы

Для цитирования: Трофимов А. А., Полина М. А., Гладков А. В., Токарев Д. В., Попченкова Т. Н., Здобнов С. А. Анализ и систематизация основных типов фотоэлектронных преобразователей, используемых при построении информационно-измерительных систем положения объектов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 24–31. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-3

ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF MAJOR TYPES PHOTOELECTRONIC CONVERTERS USED IN CONSTRUCTION OF INFORMATION-MEASURING OBJECT POSITION SYSTEMS

**A.A. Trofimov¹, M.A. Polina², A.V. Gladkov³,
D.V. Tokarev⁴, T.N. Popchenkova⁵, S.A. Zdobnov⁶**

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4,5} iit@pnzgu.ru, ⁶ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* The modern development of rocket and space technology, weapons and military equipment, aviation, engine building, products for nuclear energy, etc., largely depends on the technical level of the information and measurement and control systems (IIUS) of mobile multi-functional systems used in them. In special equipment, the IIUS is operated under the influence of a large number of destabilizing factors: shocks, vibrations, linear accelerations, acoustic noise, a wide range of acting temperatures. *Materials and methods.* In solving the set tasks, the method of sample-out measures, the method of inverse conversion of the introduction of accurate and stable inverse code converters into movement, the method of auxiliary measurements, and the functional processing algorithm were used. *Results.* Standard structures and algorithms of operation of photoelectronic information-measuring systems for monitoring parameters of spatial position of objects (FILISP) were systematized, systematization of FILISP was proposed. The basic

principles of photovoltaic converters construction are proposed. A structural diagram has been developed on the basis of which it is possible to create spatial position transducers for information-measuring and control systems.

Keywords: photoelectronic converter, sensitive element, structural diagram, system-tization, destabilizing factors

For citation: Trofimov A.A., Polina M.A., Gladkov A.V., Tokarev D.V., Popchenkova T.N., Zdobnov S.A. Analysis and systematization of major types photoelectronic converters used in construction of information-measuring object position systems. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4): 24–31. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-3

Современные тенденции развития информационно-измерительных и управляющих систем подвижных многофункциональных комплексов (строительная техника, самолеты, космические аппараты, ракеты, наземные комплексы вооружения и т.д.) требуют применения высокоточных, простых в изготовлении и стабильных в экстремальных условиях эксплуатации ИИУС контроля параметров пространственного положения объектов. Такие ИИУС представляют собой совокупность перемещающегося геометрического тела (оси антенн и сканирующих зеркал, различного рода поворотные устройства, чувствительные элементы датчиков аэродинамических углов, измерителей давления среды и т.д.) и механически или оптически связанных с ним преобразователей пространственного положения. Получившие широкое распространение в ИИУС многофункциональные комплексы фотоэлектронных преобразователей отличаются высокой чувствительностью и быстродействием, малыми габаритами, возможностью эффективного применения различных методов стабилизации выходных параметров при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

В настоящее время получили распространение различные методы моделирования (ФИИСП), в своем большинстве основанные на статистическом подходе к оценке информативных параметров перемещающегося объекта и влияния внешних дестабилизирующих факторов на выходные параметры преобразователей пространственного положения. Созданы частные модели пространственно-информационных и энергоинформационных процессов в фотоэлектронных преобразователях. Вместе с тем проблема создания и применения методов моделирования фотоэлектронных систем измерения параметров положения объектов остается актуальной. В известных моделях отсутствует комплексный учет функциональных связей параметров инструментальных погрешностей с эксплуатационными факторами. Имеет место незавершенность исследований в области применения традиционных и поиска новых путей повышения стабильности и точности ФИИСП в реальном масштабе времени. Не исследованы вопросы модуляции оптического сигнала от внешнего источника, преобразования распределенной освещенности в электрический сигнал в фоточувствительных элементах с накоплением заряда и в фотоэлектронных преобразователях с прямым измерением освещенности, применения согласованной (оптимальной) фильтрации для выделения точечных объектов.

Все это обуславливает необходимость развития теории фотоэлектронного преобразования положения объектов и разработки методов моделирования ФИИСП, основанных на комплексном учете воздействия дестабилизирующих факторов.

Анализ литературных источников [1–4] показывает, что фотоэлектронные информационно-измерительные системы контроля параметров положения объектов, применяемые в подвижных многофункциональных комплексах, могут быть систематизированы по многим признакам, основными из которых являются: характер измеряемых пространственных положений, форма контакта чувствительных элементов (ЧЭ) преобразователей пространственного положения с перемещающимся объектом, конструктивное исполнение, структура построения, вид промежуточного и выходного сигналов (рис. 1).

По характеру пространственного положения различают ФИИСП с линейными, угловыми и комбинированными многомерными перемещениями объекта контроля. В целом ФИИСП представляет собой совокупность механически или оптически связанных узлов: перемещающегося объекта (ось антенны, отражающего зеркала, подвижный шток, автономный источник излучения и др.) и одно-, двухкоординатных оптоэлектронных преобразователей пространственного положения (ОПП) [1]. Совокупность выходной информации ОПП, представленная в виде, удобном для потребителя, является выходной информацией ФИИСП [5].

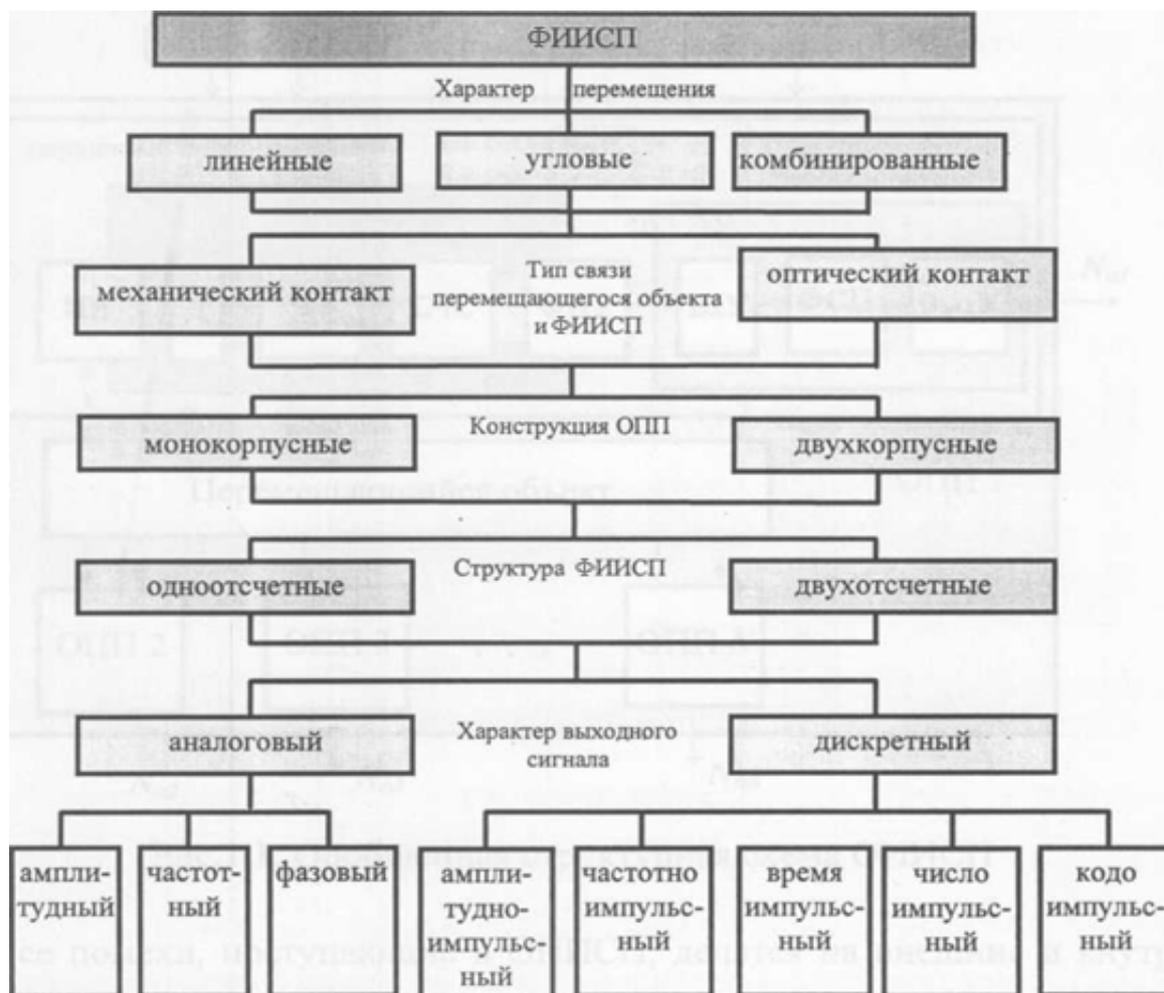


Рис. 1. Систематизация ФИИСП

По количеству отсчетов ФИИСП подразделяются на одноотсчетные и многоотсчетные. В одноотсчетных системах функции преобразования возложены на модулирующее сопряжение ЧЭ с расположенными по определенному закону считывающими элементами (СчЭ), которые выдают информацию о перемещении объекта в виде оптического или потенциального сигнала. Системы, в которых из оптических или электрических сигналов извлекается дополнительная информация, получили наименование двухотсчетных, трехотсчетных и т.д. Первый отсчет считается грубым и определяется геометрическими параметрами ЧЭ и СчЭ. Второй и другие отсчеты (промежуточный, точный) получаются в результате интерполяции и дополнительной обработки одного из параметров сигнала с выхода СчЭ.

На рис. 2 показана обобщенная структурная схема ФИИСП. Перемещающийся объект оптически или механически связан с преобразователями перемещений, каждый из которых определяет, как правило, одну или две координаты перемещения. Оптические лучи от источников излучения ИИ проходят через диафрагму Д, среду распространения света и оптическую систему ОС к ЧЭ. С выхода ЧЭ, связанного механически или оптически с перемещающимся объектом, промодулированные по одному из параметров световые лучи воспринимаются считывающей системой СчС, состоящей из одного или нескольких считывающих элементов (СчЭ). После модулирующего сопряжения (МС) чувствительного и считывающих элементов сформированные оптические сигналы попадают на фотоприемное устройство (ФПУ), в котором из них получаются электрические сигналы, пропорциональные измеряемой величине. Эти сигналы подвергаются обработке в электронном узле (ЭУ), состоящем из входного устройства ВхУ, формирователя сигнала перемещения ФСП и выходного устройства ВыхУ, которое выдает информацию N_a в виде, удобном для потребителя.

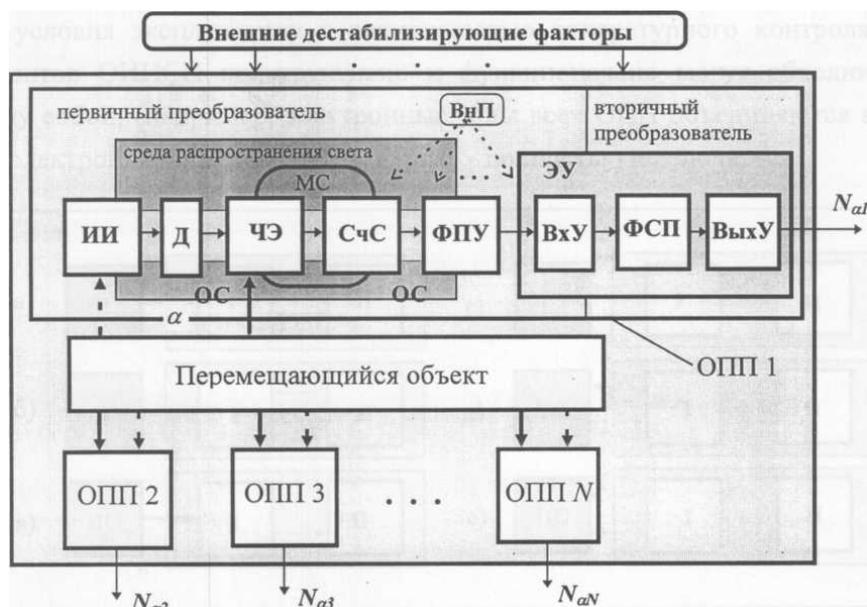


Рис. 2. Обобщенная структурная схема ФИИСП

Все помехи, поступающие в ФИИСП, делятся на внешние и внутренние. Внешние помехи и дестабилизирующие факторы (ВДФ), вызывающие паразитную модуляцию и затухание светового потока, шум на выходе усилителя фототока, – это виброударные воздействия на кинематические звенья, влияние радиационного облучения, температурных и электромагнитных полей на оптические, механические и электронные элементы и т.д.

Внутренние помехи (ВнП) или шумы носят, как правило, аддитивный характер и генерируются излучателем, фотоприемником, усилителем, элементами нагрузочной цепи, регистраторами и формирователями сигнала перемещения. Обычно ограничиваются оценкой влияния шумов первого каскада усиления, где полезный сигнал относительно мал в сравнении с шумами.

Конструктивно ФИИСП выполняются в едином корпусе или разделены на связанные между собой отдельные конструктивные блоки (рис. 3). Первичные преобразователи устанавливаются непосредственно у измеряемого объекта, куда обычно ограничен или отсутствует доступ для проверки работоспособности ФИИСП. Вторичные преобразователи выносятся в комфортные условия эксплуатации с возможностью аппаратного контроля. Ряд элементов ФИИСП конструктивно и функционально могут объединяться между собой, другие – полностью исключаться.

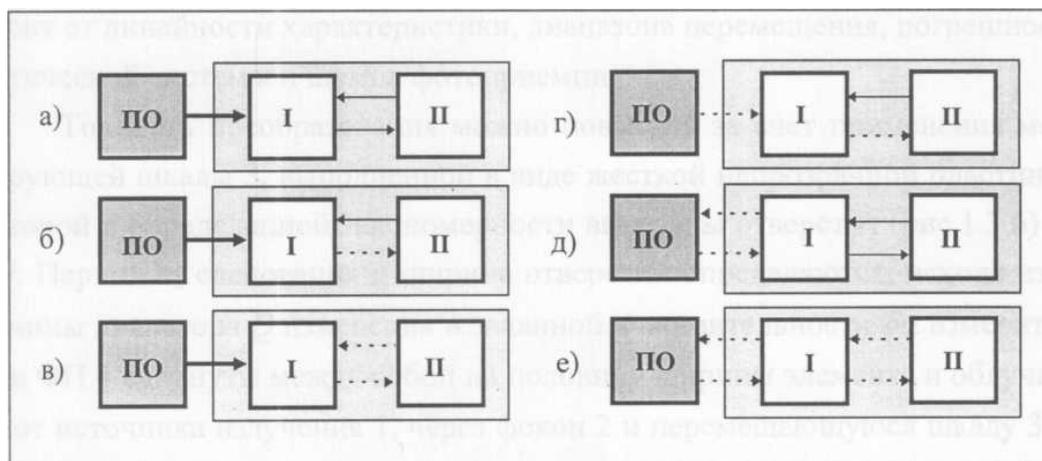


Рис. 3. Варианты разделения конструктивных блоков при кинематической и оптической связи ФИИСП с измеряемым объектом: ПО – перемещающийся объект; I, II – первый и второй конструктивные блоки; \longrightarrow – гальваническая связь; $\cdots\cdots\longrightarrow$ – оптическая связь; \longrightarrow – кинематическая связь

Варианты конструктивного разделения ФИИСП:

- а) источники излучения и ФПУ находятся в первом конструктивном блоке и запрашиваются по гальваническим линиям связи, с выхода блока I на вход блока II подается электрический сигнал;
- б) источники излучения в блоке I, ФПУ – вынесены в блок II, оптическая связь осуществляется с помощью волоконных световодов;
- в) источники излучения и ФПУ вынесены в блок II;
- г) источник излучения – перемещающийся объект, ФИИСПУ могут размещаться в блоке I или в блоке II;
- д) источники излучения и ФПУ в блоке I;
- е) источники излучения и ФПУ в блоке II.

Метрологические и эксплуатационные параметры преобразователей зависят от достигнутого технического и технологического уровня в области материаловедения, точной механики, оптики, оптоэлектроники, микроэлектроники и цифровой техники. Первичные преобразователи – наиболее чувствительная к помехам и дестабилизирующим факторам часть ФИИСП [6, 7]. Снижение влияния помех и ВДФ на точность и стабильность преобразования, на эксплуатационную надежность ФИИСП в целом является одной из наиболее актуальных проблем при создании многофункциональных подвижных комплексов.

Предъявляемые к ФИИСП требования по точности и стабильности в значительной степени зависят от особенностей функционирования комплекса, характера выполняемых задач. К многофункциональным комплексам, на которых в том или ином виде могут устанавливаться ФИИСП, относятся летательные и космические аппараты, управляемые ракеты различного радиуса действия, подводные и надводные корабли, наземные стационарные и подвижные системы сопровождения и целеуказания. Диапазон преобразуемых линейных перемещений от единиц миллиметров до десятков сантиметров, угловые перемещения – от единиц градусов до полного оборота.

Для подвижных многофункциональных комплексов в настоящее время и в перспективе требуются простые в изготовлении, относительно недорогие, точные и стабильные ФИИСП, способные стабильно выдавать достоверную информацию и предотвращать выдачу информации к потребителям при возникновении явного или неявного параметрического отказа. Это предполагает создание ФИИСП, в которых, кроме традиционных способов стабилизации параметров и защиты конструктивных элементов, производится автокоррекция и допусковый контроль погрешностей, вызванных внешними дестабилизирующими факторами, применяются конструкционные, схемотехнические и алгоритмические методы повышения устойчивости к воздействию ВДФ. Такие ФИИСП могут разрабатываться на базе новых и серийных преобразователей.

Структура мероприятий по разработке и доработке ФИИСП для подвижных многофункциональных комплексов показана на рис. 4. Создание высокопрочных и параметрически стабильных материалов, вопросы резервирования узлов и элементов являются отдельными научными проблемами, которые в данной работе не рассматриваются. Объектами проводимых исследований являются обоснование принципов построения и математического моделирования фотоэлектронного преобразования положения в пространстве, реализация в моделях ФИИСП методов автокоррекции, помехоустойчивого кодирования перемещений, стабилизации параметров оптического и электрического сигналов.

Метод образцовых мер требует высокостабильных источников измеряемых единиц, что для первичного преобразователя сложно реализуемо в виде эталонных перемещений, но широко применяется во вторичном преобразователе в форме эталонных сигналов. Метод обратного преобразования основан на использовании введения точных и стабильных обратных преобразователей кода в перемещение. Метод легко реализуем во вторичных преобразователях, осуществляющих амплитудную интерполяцию сигнала с выхода первичного преобразователя. Реализация тестовых методов проходит с аппаратурными затратами и низким быстродействием. Метод вспомогательных измерений требует построения моделей конкретных типов первичных преобразователей с целью выявления доминирующих составляющих ИП функционально связанных с параметрами ВДФ. Метод создает возможность непосредственного или косвенного измерения параметров ВДФ.

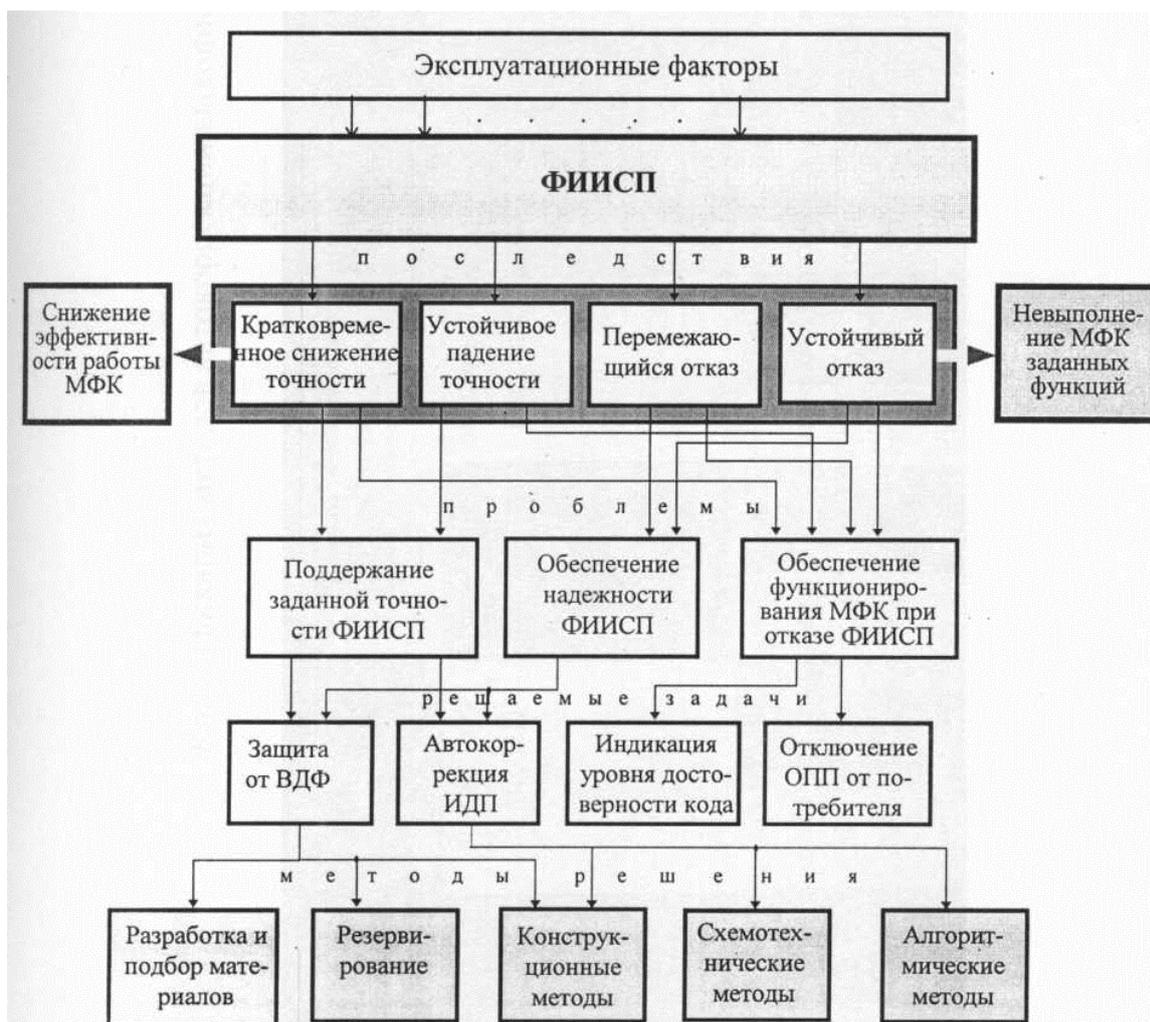


Рис. 4. Структура мероприятий по разработке ФИИСП для подвижных многофункциональных комплексов

Хорошие перспективы для повышения точности открывает использование алгоритмов функциональной обработки. Известные решения предусматривают либо введение дополнительных измерительных каналов, либо дополнительных циклов измерения в одном канале. Виды обработки: статистическая (усреднение), построение аппроксимационных полиномов, логическая и логико-цифровая обработка полнофазных сигналов по жесткой или гибкой программе. Статистическая обработка не всегда обеспечивает заданную точность даже при большом числе измерительных каналов. Более высокую точность и стабильность дает логическая обработка сигналов.

Исследование структурных схем и алгоритмических моделей ФИИСП и ОПП, анализ литературы по вопросам проектирования ИИУС указывают на необходимость систематизации знаний по особенностям работы ФИИСП с целью разработки рекомендаций по поддержанию и повышению их точности и стабильности при воздействии ВДФ.

В целом проблема исследований состоит в обеспечении высокой точности и стабильности ФИИСП в условиях воздействия ВДФ и включает в себя: анализ влияния ВДФ на параметры погрешностей ФИИСП; исследование пространственных и энергетических характеристик преобразователей перемещений; анализ влияния инструментальных и дополнительных погрешностей на параметры выходного сигнала ФИИСП; разработку алгоритмов работы и структурных схем ФИИСП и ОПП, устойчивых к воздействию ВДФ; выработку практических рекомендаций и предложений по проектированию и изготовлению ФИИСП.

С учетом поставленной проблемы задача исследований формулируется следующим образом: на основе данных о влиянии ВДФ на параметры ФИИСП необходимо разработать методы

моделирования, алгоритмы функционирования, структурные и конструктивные схемы ФИИСП, направленные на достижение требуемых значений точности и стабильности преобразования.

Поставленная задача определяет следующую структуру исследований: формирование математической модели оптоэлектронного преобразования перемещения геометрического тела, на основе которой строятся частные математические модели модулирующих сопряжений, в результате анализа которых определяются функциональные связи между погрешностями и параметрами выходного сигнала; моделирование ФИИСП и ОПП, в которых реализуются методы автокоррекции и допускового контроля ИП; разработка рекомендаций по созданию ФИИСП.

Показаны общие направления повышения стабильности преобразования и защиты потребителей от недостоверной информации. Определена структура исследований, которая включает: создание математических моделей фотоэлектронного преобразования, выявляющих пути компенсации погрешностей; определение границ возможностей их автокоррекции; поиск рациональных и эффективных структурно-алгоритмических и конструктивных способов повышения точности и стабильности преобразования.

Заключение

Проведен обзор и систематизация типовых структур и алгоритмов работы ФИИСП, предложена систематизация ФИИСП, а также приведены примеры реализации различных ФИИСП.

Изложены основные принципы построения фотоэлектрических преобразователей. Разработана обобщенная структурная схема, на основе которой возможно создание преобразователей определения пространственного положения для ИИУС.

Построены и исследованы модели функциональных связей ВДФ с параметрами ИП пространственного и энергетического характера. Для ФИИСП с конструктивным разделением первичных и вторичных преобразователей доминирующими ВДФ являются виброударные воздействия, температурные перепады и ионизирующее излучение, непосредственно воздействующие на кинематические звенья, оптические и фотоприемные элементы первичных преобразователей.

Список литературы

1. Леонович Г. И. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений для жестких условий эксплуатации. Самара, 1998. 264 с.
2. Преснухин Л. П. Фотоэлектрические преобразователи информации. М. : Машиностроение, 1974.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А., Нефедьев Д. И. Датчики частоты вращения : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 80 с.
4. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.
5. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. М. : Физматлит, 2003. 784 с.
6. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
7. Кирьянов В. Л., Гладков А. В., Трофимов А. А. Магнитооптический датчик частоты вращения // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации «Шляндинские чтения–2020» : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 16–18.

References

1. Leonovich G.I. *Optoelektronnyye tsifrovyye datchiki peremeshcheniy dlya zhestkikh usloviy ekspluatatsii = Optoelectronic digital displacement sensors for harsh operating conditions*. Samara, 1998:264. (In Russ.)
2. Presnukhin L.P. *Fotoelektricheskie preobrazovateli informatsii = Photoelectric converters of information*. Moscow: Mashinostroeniye, 1974. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.A., Nefed'ev D.I. *Datchiki chastoty vrashcheniya: ucheb. posobie = Rotational speed sensors : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2015:80. (In Russ.)
4. Trofimov A.N., Trofimov A.A. *Vzaimoinduktivnyye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (In Russ.)
5. Soyfer V.A. (ed.). *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy = Methods of computer image processing*. Moscow: Fizmatlit, 2003:784. (In Russ.)

6. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
7. Kir'yakov V.L., Gladkov A.V., Trofimov A.A. Magneto-optical speed sensor. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii – «Shlyandinskie chteniya 2020»: sb. st. po materialam Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Methods, means and technologies for obtaining and processing measuring information "Shlyandinsky readings–2020" : collection of articles based on the materials of the International scientific and technical conf.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:16–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мария Александровна Полина

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polina.marya2015@yandex.ru

Mariya A. Polina

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Владимирович Гладков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Aleksey V. Gladkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Вячеславович Токарев

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Denis V. Tokarev

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Татьяна Николаевна Попченкова

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Tat'yana N. Popchenkova

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Здобнов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zdobnov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 11.10.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.10.2021

Принята к публикации/Accepted 20.10.2021