

# ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

*Научно-производственный журнал*

№ 1, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В.*  
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА 5
- Ревунов М. С., Ревунов Д. С., Семенов А. Д.*  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ  
РЕГУЛИРОВАНИЯ МАССЫ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА 17
- Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е.*  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РАСТРОВОЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЙ 24
- Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е., Пономарев В. Н.*  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО  
ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ 31
- Наумова А. Ю., Дмитриевцев А. Ю., Зырянов Ю. Т.*  
ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ И АЛГОРИТМА  
ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ 38
- Григорьян А. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. А.*  
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ  
В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ  
ТРАКТЕ КОММУТАЦИОННО-ТАКТОВОЙ  
ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ 45

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Печерская Е. А., Гурин С. А., Новичков М. Д.*  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ  
МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР 56

**КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ**

***Белокопытов М. А., Ушанев К. В.***

МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ  
АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
НА ЭТАПЕ ИХ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ

62

***Лавров Р. О., Афонин Г. И., Ширямов О. А.***

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ОБРАЗЦОВ  
ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

70

# MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

*Scientific-production journal*

№ 1, 2023

## CONTENT

### INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V.*  
THEORETICAL ESTIMATION METROLOGICAL CHARACTERISTICS  
OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL  
SYSTEMS ELECTRIC DRIVE 5
- Revunov M.S., Revunov D.S., Semenov A.D.*  
IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED CONTROL  
SYSTEM FOR REGULATING THE WEIGHT OF THE PAPER WEB 17
- Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E.*  
MULTIFUNCTIONAL RASTER MOTION SENSOR 24
- Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E., Ponomarev V.N.*  
MATHEMATICAL MODEL OF A TRANSFORMER  
LINEAR DISPLACEMENT SENSOR 31
- Naumova A.Yu., Dmitrievtsev A.Yu., Zyryanov Yu.T.*  
DATABASE AND ALGORITHM FORMATION FOR TECHNICAL  
DIAGNOSTICS OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT  
OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM 38
- Grigoryan L.R., Bogatov N.M., Grigoryan R.L.*  
APPLICATION OF MICROCONTROLLERS  
IN A SOFTWARE-CONFIGURABLE MEASURING  
SWITCHING-CLOCK PATH PHASE MEASURING EQUIPMENT 45

### INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

- Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D.*  
HIGH-TEMPERATURE ANNEALING  
OF MULTILAYER RESISTIVE STRUCTURES 56

## **CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS**

***Belokopytov M.L., Ushanev K.V.***

THE MODEL OF AN INTELLECTUALIZED SYSTEM ON-BOARD  
MONITORING AND DIAGNOSTICS SPACECRAFT INSTRUMENTS  
AT THE STAGE OF THEIR TESTING AND APPLICATION

62

***Lavrov R.O., Afonin G.I., Shiryamov O.A.***

PROCEDURE FOR EVALUATING LABOUR INTENSITY  
OF METROLOGICAL EXAMINATION OF WEAPONS  
AND MILITARY EQUIPMENT

70

# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

## INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.5.034

doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**М. В. Мостовской<sup>1</sup>, В. В. Слепцов<sup>2</sup>, В. П. Орлов<sup>3</sup>, С. В. Артемова<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>1,4</sup>mvmmost@yandex.ru, <sup>2</sup>vsleptsov@gmail.com, <sup>3</sup>ovp403@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Предлагается методика определения метрологических характеристик электроприводов промышленного назначения на ранних стадиях проектирования. *Материалы и методы.* Приводится теоретическая методика оценки метрологических характеристик электроприводов промышленного назначения согласно требованиям, предъявляемым ГОСТ 27803-91. Подробно освещены основные этапы исследований, расчетные формулы и рекомендации к проведению практических испытаний. Разработана имитационная модель информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с двигателем ДПУ-200-550-3-Д41. *Результаты и выводы.* Представлены результаты имитационного моделирования и практических испытаний информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с двигателем ДПУ-200-550-3-Д41, соответствующие требованиям ГОСТ 27803-91.

**Ключевые слова:** электропривод, диапазон регулирования скорости, коэффициент неравномерности вращения, погрешность скорости вращения, двигатель постоянного тока, имитационная модель

**Для цитирования:** Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

### THEORETICAL ESTIMATION METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS ELECTRIC DRIVE

**M.V. Mostovskoy<sup>1</sup>, V.V. Sleptsov<sup>2</sup>, V.P. Orlov<sup>3</sup>, S.V. Artemova<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

<sup>1,4</sup>mvmmost@yandex.ru, <sup>2</sup>vsleptsov@gmail.com, <sup>3</sup>ovp403@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Determination of the metrological characteristics of electric drives for industrial use at the early stages of design. *Materials and methods.* A theoretical method for determining the metrological characteristics of industrial electric drives in accordance with the requirements specified in GOST 27803-91 is given. The main stages of research, calculation formulas and recommendations for conducting practical tests are covered in detail. A simulation model of an information-measuring and control system of an electric drive with a DPU-200-550-3-D41 engine has been developed. *Results and conclusions.* The results of simulation modeling and practical testing of the information-measuring and control system of an electric drive with a DPU-200-550-3-D41 engine that meet the requirements of GOST 27803-91 are presented.

**Keywords:** electric drive, speed control range, rotation non-uniformity coefficient, rotation speed error, DC motor, simulation model

**For citation:** Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical estimation metrological characteristics of information-measuring and control systems electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):5–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

### *Введение*

Одним из наиболее энергоемких потребителей и преобразователей электрической энергии являются электрические приводы [1]. Электрический привод (ЭП) представляет собой совокупность электромеханических и информационно-управляющих устройств, задачей которого является преобразование электрической энергии и приведение в движение исполнительных органов промышленного оборудования широкого спектра применения. Основными составляющими регулируемого электропривода являются электрический двигатель (постоянного или переменного тока), исполнительные механизмы, информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС), включающая в себя датчики обратных связей [2].

Электрические приводы, применимые в составе промышленного оборудования, можно классифицировать по типу контролируемого параметра (скорость, положение). Так, например, в металлообрабатывающих станках основным контуром управления является замкнутый контур управления положением, который обеспечивает с заданной точностью движение рабочего органа (режущего инструмента или координатного стола) над поверхностью обрабатываемой детали. Перемещение рабочего органа в пределах рабочего пространства станка выполняет двух ( $X, Y$ ) или трех ( $X, Y, Z$ ) координатная механическая система, которая включает электрические приводы, систему измерения линейных и угловых перемещений и кинематическую схему. Следует отметить, что потребительские характеристики технологических машин (станков, промышленных роботов, лазерных технологических установок, робокаров и др.) во многом определяются метрологическими характеристиками входящих в их состав электроприводов.

С практической точки зрения определение метрологических характеристик разрабатываемых электроприводов технологических машин является крайне трудной задачей, требующей наличия серьезных материально-технических возможностей. Однако современные компьютерные технологии, в основе которых лежат прикладные пакеты, предоставляют возможность глубокого изучения вопросов, связанных с проектированием и исследованием ЭП на ранних стадиях проектирования. Подобные методики изложены в статье и литературе [3–5].

### *Материалы и методы*

В статье [6] описана методика оценки метрологических характеристик регулируемого электрического привода (РЭП) методом схемотехнического моделирования. Основной концепцией методики является разработка и исследование имитационной модели разрабатываемого электропривода согласно требованиям ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования» на соответствие общим требованиям и расчетным формулам для определения погрешности скорости при изменении нагрузки, коэффициента неравномерности вращения и диапазона регулирования скорости, изложенным в пп. 2.4.7, 2.4.10.

Предлагаемая методика оценки метрологических характеристик регулируемых электроприводов содержит следующие пункты [6]:

- разработка или выбор математической модели исследуемого электродвигателя;
- разработка обобщенной модели разрабатываемой ИИУС ЭП;
- расчет параметров регуляторов и датчиков обратной связи;
- расчет коэффициента неравномерности  $k_n$  и диапазона регулирования скорости  $D$ ;
- проведение измерений.

### *Математическая модель электродвигателя*

Согласно условию данного пункта математическая модель разрабатываемого электродвигателя должна представлять собой систему дифференциальных уравнений, описывающую основные электромеханические процессы, происходящие в двигателе. Основным критерием качества разработанной математической модели является соответствие переходных процессов (тахограмм) скорости вращения с тахограммами реального электрического двигателя, работающего в режиме прямого пуска. В случае разработки модели бесколлекторного двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя сравнение тахограмм скорости осуществляется

прямым пуском с ограничением питающего напряжения. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования может осуществляться в таких программных пакетах, как *Matlab Simulink*, *SimInTech*, *Scilab*, *LabVIEW* и др. При необходимости (в случае больших расхождений результатов моделирования – на практике более 10 %) математическая модель корректируется до обеспечения необходимой точности. Разработанная математическая модель служит эталоном, по которому можно сверять результаты исследований.

Рассмотрим пример реализации пункта 1 данной методики на примере регулируемого по скорости ЭП с магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока (МДПТ) ДПУ-200-550-3-Д41, математическая модель которого, включая модель исполнительного органа, приводится в литературе [5, 7–9], а основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики двигателя ДПУ-200-550-3-Д41

Номинальная мощность электродвигателя, Вт	550
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Напряжение питания электродвигателя, В	92
Номинальный ток якоря электродвигателя, А	7,4
Номинальный момент, Нм	1,7
Момент инерции электродвигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,00005
Сопrotивление обмотки якоря электродвигателя, Ом	1,2
Индуктивность обмотки якоря электродвигателя, Гн	0,001
Коэффициент передачи по моменту, Н·м/А	0,23
Коэффициент противоЭДС, В·с/рад	0,29

Система дифференциальных уравнений двигателя имеет вид

$$\begin{cases} U_{обм} = R_{обм} I_{обм} + L \frac{dI_{обм}}{dt} + k_{ЭДС} \omega; \\ J \frac{d\omega}{dt} = k_m I_{обм} - M_n, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{обм}$ ,  $I_{обм}$  – напряжение и ток в обмотке статора;  $R_{обм}$ ,  $L_{обм}$  – сопротивление и индуктивность обмотки якоря;  $J$  – момент инерции двигателя;  $k_{ЭДС}$ ,  $k_m$  – конструктивные коэффициенты электродвигателя;  $\omega$  – угловая частота;  $M_n$  – момент на валу двигателя.

В свою очередь конструктивные коэффициенты ДПТ рассчитываются по выражениям

$$k_m = \frac{M_n}{I_n}; k_{ЭДС} = \frac{30(U_n - R_{обм} I_n)}{\pi n_n},$$

где  $n_n$  – номинальная скорость вращения;  $M_n$  – номинальный момент электродвигателя.

Проведем сравнительный анализ переходных процессов линейной и физической имитационных моделей МДПТ при прямом пуске (рис. 1). Моделирование будем проводить в программе *Matlab Simulink*.

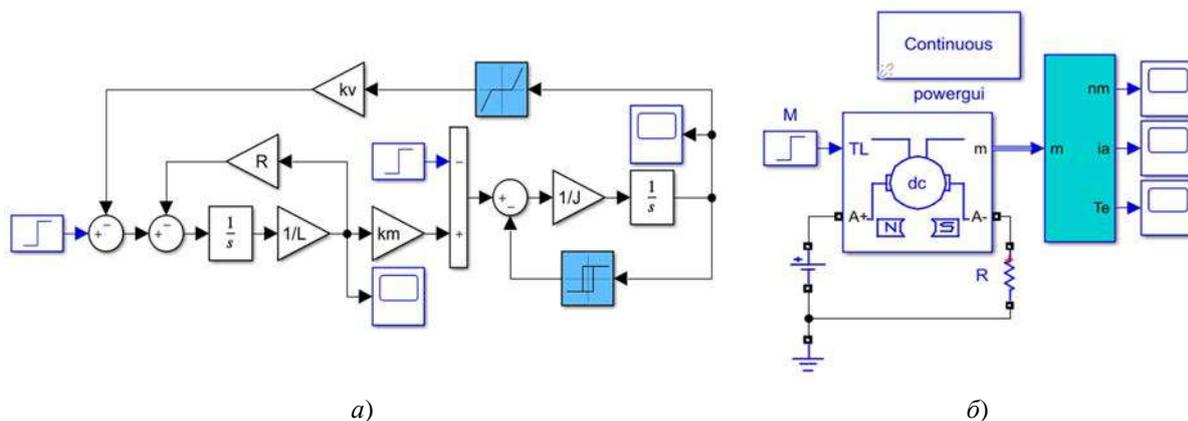


Рис.1. Линейная (а) и физическая (б) модели МДПТ в программе *Matlab Simulink*

Линейная модель МДПТ (рис. 1,а) повторяет систему дифференциальных уравнений (1) и собрана из стандартных блоков библиотеки *Matlab Simulink*, а физическая модель МДПТ представляет собой блок *DC Machine* библиотеки *Specialized Power Systems*.

Для проведения исследования подадим на вход моделей скачкообразное входное напряжение амплитудой 92 В и определим переходные процессы типа  $I_{обм}(t)$ ,  $\Omega(t)$  (рис. 2).

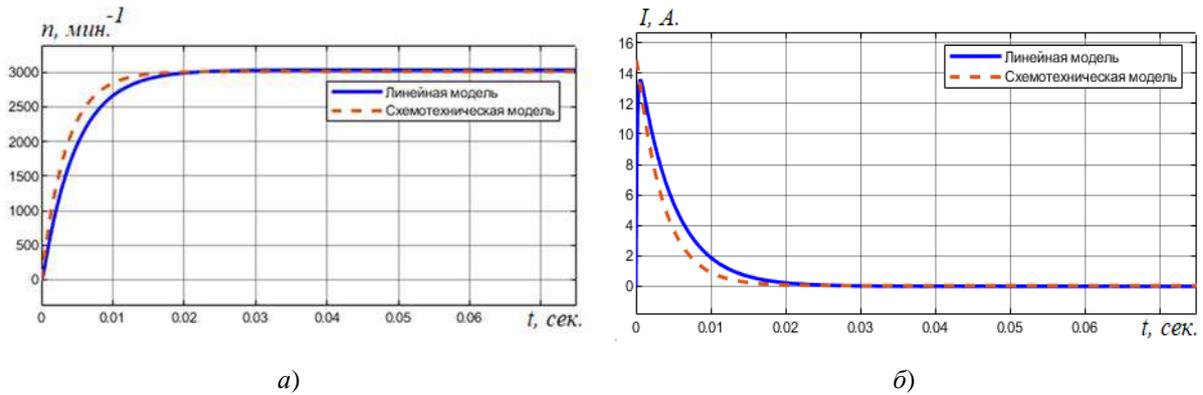


Рис. 2. Переходные процессы в имитационных моделях

Из рисунка видно, что переходные процессы для линейной и физической модели практически совпадают (расхождение по скорости не превышает 10 %).

### Разработка общей имитационной модели ЭП

Данный пункт заключается в разработке имитационной модели ИИУС электропривода согласно структурной и функциональной схемам и отражает основные особенности разрабатываемого электропривода. Как правило, обобщенная виртуальная имитационная модель ЭП содержит модели электрических двигателей, исполнительных устройств, регуляторов, датчиков обратных связей, преобразователей координат, широтно-импульсных модуляторов (ШИМ), силовых преобразователей и других и имеет вид, представленный на рис. 3.

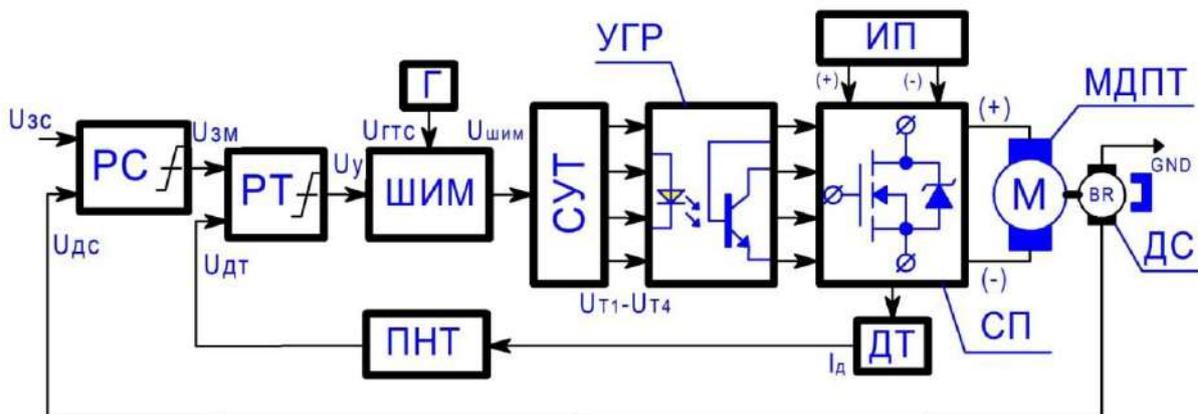


Рис. 3. Функциональная схема ЭП с преобразователем типа ПРШ-102, электродвигателем ДПУ-200-550 и тахогенератором ТП-50: РС, РТ – регуляторы скорости и тока; ГТС – генератор треугольного сигнала; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; СУТ – схема управления транзисторами; УГР – устройство гальванической развязки; СП – силовой преобразователь; ДПТ – двигатель постоянного тока; ПНТ – преобразователь ток/напряжение; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости

Линейная имитационная модель ИИУС ЭП содержит модели электрического двигателя, исполнительных устройств, регуляторов, датчиков обратных связей, силовых преобразователей и т.д. и имеет вид, представленный на рис. 4.

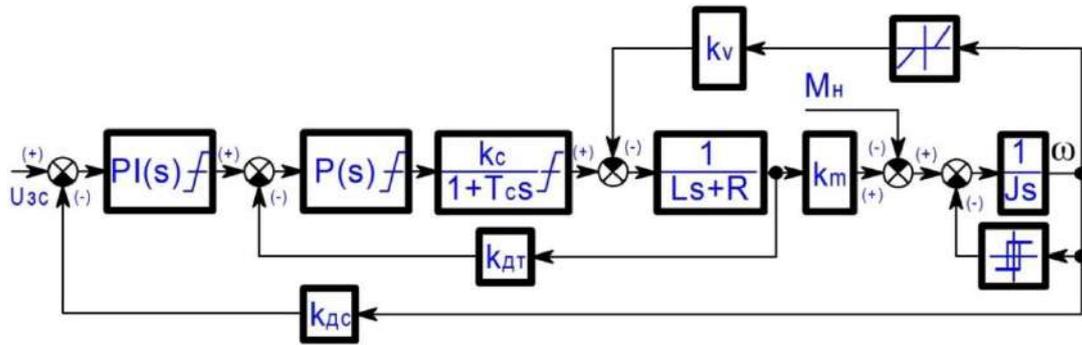


Рис. 4. Линейная имитационная модель ИИУС ЭП

Коэффициенты передачи датчика тока [10], датчика скорости и силового преобразователя можно рассчитать по выражениям (2), (3) и (4) соответственно:

$$k_{дт} = \frac{U_{р\tau}}{2i_{я}^H}, \quad (2)$$

где  $U_{р\tau}$  – максимальное выходное напряжение регулятора тока;  $i_{я}^H$  – номинальный ток якоря двигателя;

$$k_{дс} = \frac{U_{р\omega}}{\omega_{max}}, \quad (3)$$

где  $U_{р\omega}$  – максимальное выходное напряжение регулятора скорости;  $\omega_{max}$  – максимальная угловая скорость двигателя;

$$k_{сп} = \frac{U_{пит}}{U_{y,max}}, \quad (4)$$

где  $U_{пит}$  – максимальное напряжение питания силового преобразователя;  $U_{y,max}$  – максимальное управляющее напряжение.

### Расчет параметров регуляторов

Исходя из классической теории электропривода синтез корректирующих устройств (регуляторов положения, скорости, тока) осуществляется согласно условию настройки контуров на технический и симметричный оптимум [11].

Используя стандартную математическую модель двигателя постоянного тока, передаточную функцию силового преобразователя и коэффициент передачи схемы включения датчика тока, можно определить передаточную функцию регулятора тока исходя из условия настройки контура тока на технический оптимум:

$$W_{р\tau}(s) = \frac{R}{2T_{сп}k_{сп}k_{дт}} = k_{р\tau}, \quad (5)$$

где  $k_{сп}$  – коэффициент передачи силового преобразователя;  $T_{сп}$  – постоянная времени, равная частоте ШИМ;  $R$  – сопротивление якорной обмотки двигателя;  $L$  – индуктивность якорной обмотки статора;  $k_{дт}$  – коэффициент передачи схемы включения датчика тока.

Передаточная функция регулятора скорости при настройке контура скорости на симметричный оптимум имеет вид

$$W_{р\omega}(s) = \frac{Jk_{дт}(8T_{сп}s + 1)}{32k_{м}T_{сп}^2k_{дс}s} = k_{р\omega} \frac{T_{р\omega1}s + 1}{T_{р\omega2}s + 1}, \quad (6)$$

где  $J$  – момент инерции на валу двигателя;  $k_{м}$  – электромеханический коэффициент передачи;  $k_{дс}$  – коэффициент передачи датчика скорости;  $T_{р\omega1}$ ,  $T_{р\omega2}$  – постоянные времени регулятора.

**Расчет коэффициента неравномерности  $k_n$   
и диапазона регулирования скорости  $D$**

Для определения коэффициента неравномерности вращения  $k_n$  и диапазона регулирования скорости  $D$  проведем исследование схемотехнической модели с обратной связью по скорости, подав на ее вход сигналы задания скорости в виде скачкообразных импульсов амплитудой от 10 до 0,001 В.

Коэффициент неравномерности вращения (погрешности вращения) определяется максимальным мгновенным значением скорости в установившемся режиме по формуле

$$k_n = 2 \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}},$$

где  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  – максимальное и минимальное значения мгновенной скорости двигателя.

Диапазон регулирования скорости электропривода определяется по формуле

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}},$$

где  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  – максимальная и минимальная угловая скорость электрического двигателя соответственно;  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$  – максимальная и минимальная мгновенная скорость электрического двигателя соответственно.

Далее вычисляется абсолютная погрешность скорости при изменении нагрузки (принимают большее из  $\Delta_{H1}$  и  $\Delta_{H2}$ ) для электроприводов подачи и промышленных роботов согласно выражениям

$$\Delta_{H1} = \frac{|n_{0,15M_d} - n_{0,5M_d}|}{n_{0,5M_d}} \cdot 100\%; \quad \Delta_{H2} = \frac{|n_{M_d} - n_{0,5M_d}|}{n_{0,5M_d}} \cdot 100\%.$$

Для электроприводов главного движения

$$\Delta_{H1} = \frac{|n_{M_d} - n_{0,6M_d}|}{n_{0,6M_d}} \cdot 100\%; \quad \Delta_{H2} = \frac{|n_{0,2M_d} - n_{0,6M_d}|}{n_{0,6M_d}} \cdot 100\%.$$

где  $n$ ,  $n_{0,15}$ ,  $n_{0,2}$ ,  $n_{0,5}$ ,  $n_{0,6}$  – значения скорости соответственно при моментах нагрузки  $M_d$ ,  $0,15 M_d$ ,  $0,2 M_d$ ,  $0,5 M_d$ ,  $0,6 M_d$ .

Получившиеся результаты проверяются на соответствие ГОСТ 27803-91.

**Результаты измерений**

Исходя из ранее полученных результатов [6], ясно, что факторами, значительно влияющими на погрешность скорости электропривода, являются частота ШИМ силового преобразователя и мгновенное значение нагрузки. В случае технической реализации и проведения циклов испытаний электроприводов как на двигателях постоянного, так и переменного токов становится понятно, что предлагаемая методика и используемая модель имеют ряд существенных недостатков:

– регулирующие элементы модели электропривода заданы в виде идеальных передаточных функций (дифференциальных уравнений в области преобразования Лапласа). Известно, что около 60 % выпускаемых электроприводов на базе двигателей постоянного тока промышленного применения (как в России, так и за рубежом) выполнены на аналоговой элементной базе. В случае аналогового исполнения регулирующих элементов в имитационной модели необходимо учесть технические характеристики операционных усилителей, а также влияние погрешностей пассивных элементов схемы;

– коэффициенты передачи датчиков обратной связи взяты без учета схемы их включения;

– логическая схема управления и усилитель мощности представлены в виде блока суммирования (сигнала задания регулятора тока и генератора пилообразных импульсов) и двухпозиционного реле. В данной схеме отсутствует учет влияния параметров пассивных элементов и силовых транзисторов на работу схемы;

– отсутствие исследований, описывающих влияние метода интегрирования и необходимого шага интегрирования на результаты моделирования. Правильный выбор метода интегрирования гарантирует достоверность результатов моделирования, высокую скорость расчетов и соответствие реальным испытаниям.

На основании выявленных недостатков были внесены изменения в схемотехническую модель исследуемого электропривода, согласно которым разрабатываемая имитационная модель должна полностью соответствовать принципиальной электрической схеме электропривода.

Примеры схемотехнической реализации регулятора скорости и тока в программе *Matlab Simulink* с применением библиотеки *Simscape* представлены на рис. 5.

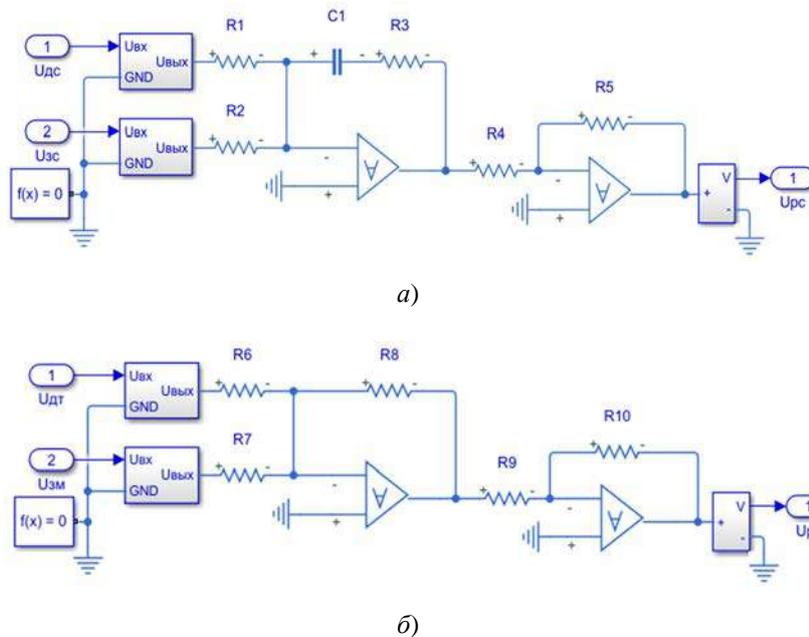


Рис. 5. Схема регулятора скорости (а) и тока (б) в программе *Matlab Simulink*

Регулятор скорости (рис. 5,а) представляет собой пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, выполненный на двух операционных усилителях *Op-Amp\_1* и *Op-Amp\_2*. Регулятор скорости, собранный на *Op-Amp\_1*, определяет рассогласование между входным воздействием и сигналом датчика скорости и вырабатывает управляющие воздействия на регулятор тока. Схемотехнически регулятор скорости построен на базе инвертирующего сумматора с частотно-зависимой обратной связью и имеет два входа: вход задания скорости и вход с датчика скорости (тахогенератора). Пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора формируются последовательным соединением конденсатора  $C_1$  и резистора  $R_3$ , а также входным сопротивлением регулятора, равным сопротивлению  $R_1$  и  $R_2$ . Устранение инверсии выходного управляющего сигнала осуществляется инвертирующим усилителем *Op-Amp\_2* с коэффициентом усиления, который определяется путем анализа выходных тахограмм.

После преобразования выражения (3) относительно схемы (рис. 5,а) расчетные формулы для регулятора примут вид

$$k_{pc} = -\frac{R_3}{R_1} \approx -\frac{J_1 k_{дт}}{32 k_m k_{дс} T_{сп}^2}; T_{pc1} \approx 8C_1,$$

где  $R_1, R_3$  – сопротивление постоянных резисторов;  $C_1$  – электрическая емкость конденсатора.

Схема регулятора тока (рис 5,б) представляет собой пропорциональный регулятор, выполненный на двух операционных усилителях *Op-Amp\_3* и *Op-Amp\_4*. Входными сигналами регулятора тока являются выходные сигналы регулятора скорости (сигнал определяет величину тока на обмотках двигателя) и преобразователя ток/напряжение. Схемотехнически регулятор скорости построен на базе инвертирующего сумматора *Op-Amp\_3*. Пропорциональный коэффициент регулятора определяется резисторами обратной связи  $R_8$  и резисторами  $R_6, R_7$ .

Устранение инверсии выходного управляющего сигнала осуществляется инвертирующим усилителем с единичным коэффициентом усиления  $Op-Amp_4$ .

После преобразования выражения (2) относительно схемы (рис. 5,б) расчетные формулы регулятора тока примут вид

$$k_{pc} = -\frac{R_8}{R_7} \approx \frac{R}{2T_{сп}k_{сп}k_{дт}},$$

где  $R_8, R_7$  – сопротивление постоянных резисторов.

Далее рассмотрим общую схемотехническую модель ИИУС электропривода на базе ДПТ с обратной связью по скорости (рис. 6). В электроприводе применяется ДПТ ДПУ-200-550-3-Д41, частота ШИМ 5 кГц.

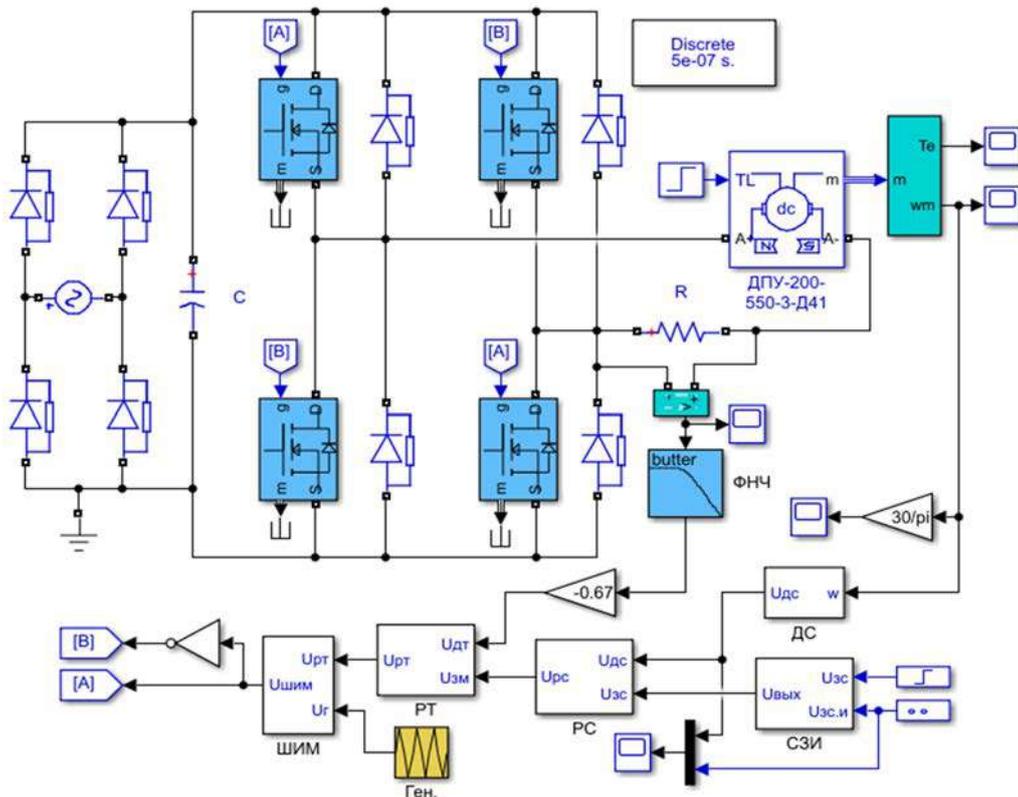


Рис. 6. Имитационная модель ИИУС электропривода в программе *Matlab Simulink*

Подадим на вход имитационной модели ИИУС электропривода (рис. 6) сигналы задания скорости амплитудой 10 и 0,002 В и рассчитаем диапазон регулирования скорости. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

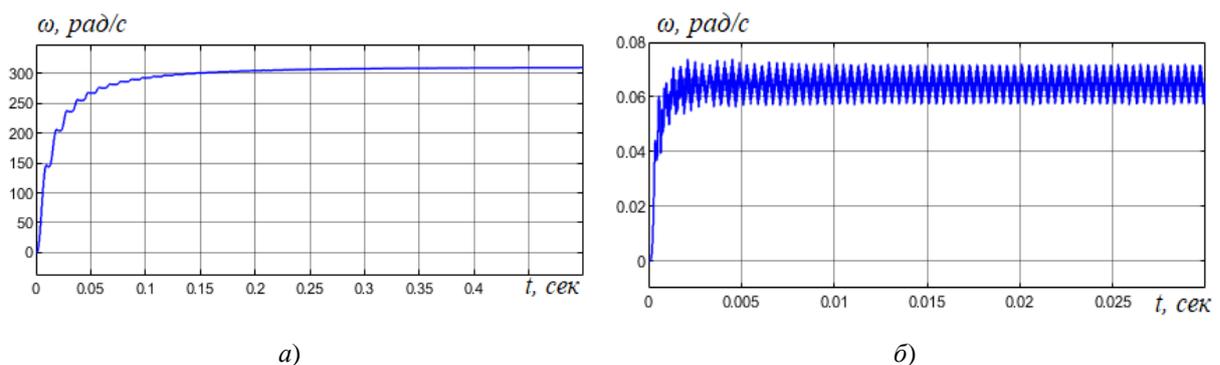


Рис. 7. Тахограммы при входных сигналах амплитудой 10 В (а) и 0,002 В (б)

Из рисунков видно, что поведение электропривода при больших и малых сигналах задания скорости сильно отличается:

– при входном сигнале амплитудой 0,002 В наблюдается перерегулирование в тахограмме примерно на 5 %, что обусловлено настройкой контура регулирования скорости на симметричный оптимум;

– при входном сигнале амплитудой 10 В в тахограмме перерегулирование отсутствует, что обусловлено действием ограничений сигналов регуляторов, усилителя мощности.

Исследования проводились на базе преобразователя типа ПРШ-102 с электродвигателем ДПУ-200-550 и тахогенератором ТП-50. Блок-схема (а) и общий вид (б) лабораторного стенда представлены на рис. 8. Испытания проводились в соответствии с методиками, предложенными в работе [12].

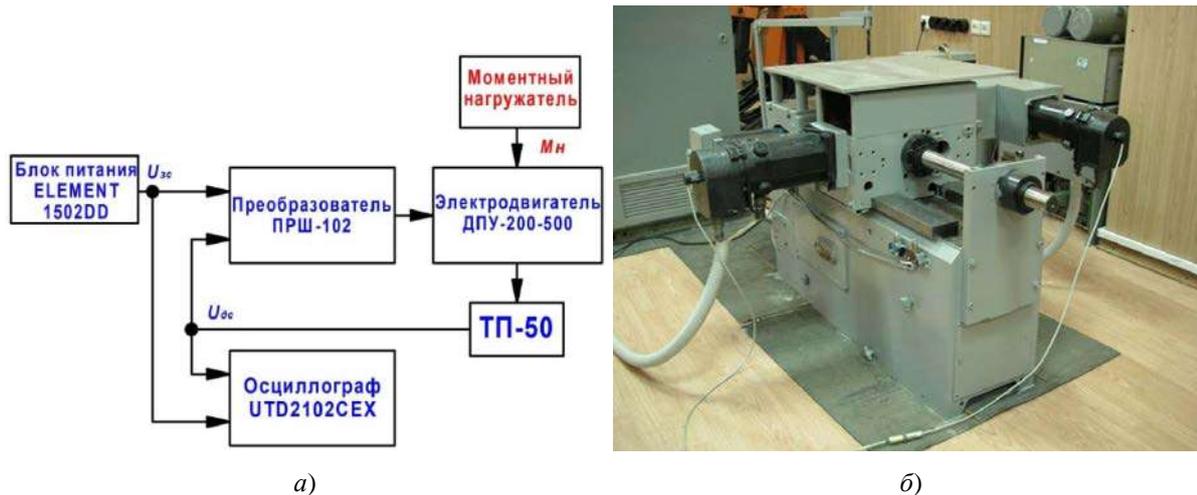


Рис. 8. Блок-схема и общий вид лабораторного стенда

Сравним получившиеся диапазоны регулирования скорости имитационной модели и лабораторного стенда

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}; D_{\text{и.м.}} = \frac{310}{0,062} = 5000; D_{\text{л.с.}} = \frac{310}{0,0621} = 4990,$$

где  $D_{\text{и.м.}}$  – диапазон регулирования скорости имитационной модели;  $D_{\text{л.с.}}$  – диапазон регулирования скорости лабораторного стенда.

Относительную погрешность диапазона регулирования скорости относительно полученных результатов рассчитаем по формуле

$$\Delta_D = \frac{|D_{\text{л.с.}} - D_{\text{и.м.}}|}{D_{\text{и.м.}}} \cdot 100\%; \Delta_D = 0,2 \%$$

Зная минимально возможную скорость, сравним получившиеся результаты относительно коэффициента неравномерности вращения имитационной модели и лабораторного стенда

$$k_n = 2 \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\max} + n_{\min}}; k_{\text{и.м.}} = 0,161; k_{\text{л.с.}} \approx 0,176,$$

где  $k_{\text{и.м.}}$  – коэффициент неравномерности имитационной модели;  $k_{\text{л.с.}}$  – коэффициент неравномерности лабораторного стенда.

Тогда относительная погрешность коэффициента неравномерности вращения

$$\Delta_k = \frac{|k_{\text{л.с.}} - k_{\text{и.м.}}|}{k_{\text{и.м.}}} \cdot 100\%; \Delta_k = 8,5 \%$$

Получившиеся результаты измерений соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91 и демонстрируют правильность работы имитационной модели.

Определим реакцию системы (лабораторного стенда и имитационной модели) на кратковременное изменение нагрузки. Результаты изменения скорости (тахограммы) в одном из направлений при скорости 140 об/мин и кратковременном действии внешнего момента 0,8 Нм представлены на рис. 9.

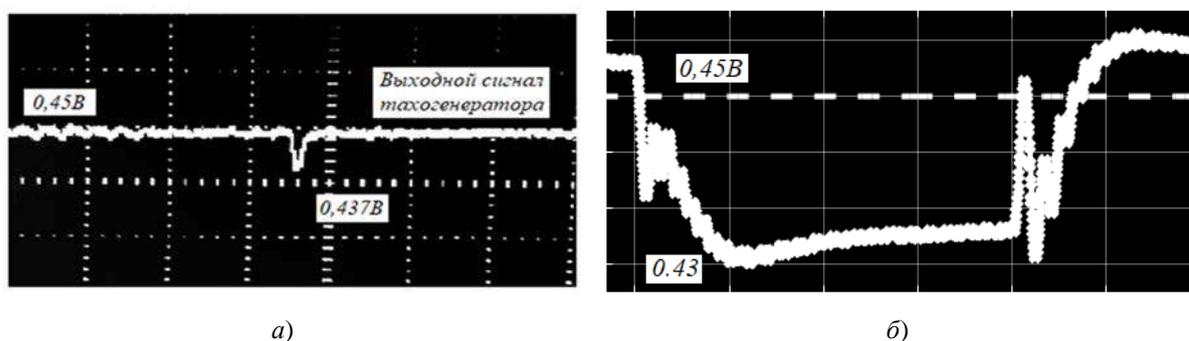


Рис. 9. Тахограмма реакции системы на внешний момент лабораторного стенда (а) и имитационной модели (б) (одна клетка соответствует 0,05 с)

Из рис. 9 видно, что при набросе внешнего возмущающего момента в обеих тахограммах наблюдается сначала провал скорости примерно на 2 %, а затем за время, равное 0,1 с, практически полное восстановление скорости. Кроме того, математическое моделирование более полно фиксирует переходные процессы. Аналогичные эксперименты проводились во всем диапазоне регулирования скорости на соответствие ГОСТ 27803-91. Было подтверждено, что диапазон регулирования скорости электропривода составляет  $\approx 5000$ .

### Заключение

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- предлагаемая методика позволяет уточнить, а в некоторых случаях определить отдельные характеристики электроприводов (диапазон регулирования, коэффициент неравномерности и пр.);
- предварительный синтез регуляторов контуров управления проектируемых ИИУС электропривода целесообразно проводить с использованием линейных моделей для обеспечения их настройки на технический и симметричный оптимумы;
- анализ ИИУС электропривода следует проводить с использованием их нелинейных моделей и программных пакетов *Matlab Simulink*, *SimInTech*, *Scilab*, *LabVIEW* и др.;
- для обеспечения минимальной погрешности расчетов целесообразно использовать программу *Matlab Simulink* с библиотекой *Simscape*.

### Список литературы

1. Терехов В. М. Системы управления электроприводов : учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Академия, 2005. 304 с.
2. Елисеев В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М. : Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
3. Высоцкий В. Е., Воронин С. М., Горшков Р. Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 1–4.
4. Герман-Галкин С. Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *Matlab 6.0* : учеб. пособие. СПб. : Корона Принт, 2017. 320 с.
6. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схематехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1. С. 22–26.
7. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов. М. : Изд. дом МЭИ, 2015. 373 с.
8. Karpagavalli P., Ebenezer Jeyakumar A. PID controller based full bridge DC-DC converter for closed loop DC motor with unipolar voltage switching // U.P.B. Sci. Bull., Series C. 2015. Vol. 77, iss. 1.

9. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. EEE Press, 2002. 613 p.
10. Терехин В. Б. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. М. : Юрайт, 2018. 306 с.
11. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления : учеб. пособие для вузов. 5-е изд., стер. СПб. : Лань, 2020. 220 с.
12. Слепцов В. В., Шмелева А. Г., Галемина А. А. Разработка стенда для определения технических характеристик регулируемых по скорости электроприводов // Приборы. 2017. № 4. С. 26–32.

### References

1. Terekhov V.M. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy = Control systems of electric drives : textbook for students of higher educational institutions*. Moscow: Akademiya, 2005:304. (In Russ.)
2. Eliseev V.A., Shinyanskiy A.V. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu = Handbook of automated electric drive*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:616. (In Russ.)
3. Vysotskiy V.E., Voronin S.M., Gorshkov R.G. Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of a valve engine. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2011;(1):1–4. (In Russ.)
4. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK = Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008:368. (In Russ.)
5. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0: ucheb. posobie = Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0 : textbook*. Saint Petersburg: Korona Print, 2017:320. (In Russ.)
6. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing metrological characteristics of a regulated electric drive by the method of circuit modeling. *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)
7. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnyk dlya vuzov = Control systems of electric drives : textbook for universities*. Moscow: Izd. dom MEI, 2015:373. (In Russ.)
8. Karpagavalli P., Ebenezer Jeyakumar A. PID controller based full bridge DC-DC converter for closed loop DC motor with unipolar voltage switching. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*. 2015;77(1).
9. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of electric machinery and drive systems*. EEE Press, 2002:613.
10. Terexhin V.B. *Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink = Computer modeling of electric drive systems in Simulink*. Moscow: Yurayt, 2018:306. (In Russ.)
11. Konovalov B.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie dlya vuzov. 5-e izd., ster. = Theory of automatic control : textbook. manual for universities. 5th ed.* Saint Petersburg: Lan', 2020:220. (In Russ.)
12. Sleptsov V.V., Shmeleva A.G., Galemina A.A. Development of a stand for determining the technical characteristics of speed-controlled electric drives. *Pribory = Devices*. 2017;(4):26–32. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Михаил Владимирович Мостовской**  
старший преподаватель кафедры приборов  
и информационно-измерительных систем,  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)  
E-mail: mvmost@yandex.ru

**Mikhail V. Mostovskoy**  
Lecturer of the sub-department of instruments  
and information and measurement systems,  
MIREA – Russian Technological University  
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Владимир Владимирович Слепцов**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры приборов  
и информационно-измерительных систем,  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)  
E-mail: vsleptsov@gmail.com

**Vladimir V. Sleptsov**  
Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of instruments  
and information and measurement systems,  
MIREA – Russian Technological University  
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Валерий Павлович Орлов**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры приборов  
и информационно-измерительных систем,  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)  
E-mail: ovpr403@yandex.ru

**Valery P. Orlov**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of instruments and information  
and measurement systems,  
MIREA – Russian Technological University  
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Светлана Валерьевна Артемова**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информатики,  
МИРЭА – Российский  
технологический университет  
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)  
E-mail: mvmost@yandex.ru

**Svetlana V. Artemova**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of informatics,  
MIREA – Russian Technological University  
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 24.10.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 23.12.2022**

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ МАССЫ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

М. С. Ревунов<sup>1</sup>, Д. С. Ревунов<sup>2</sup>, А. Д. Семенов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ОАО «МАЯК», Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> ООО «Промсистем», Пенза, Россия

<sup>2</sup> НПФ «Круг», Пенза, Россия

<sup>3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> revunov\_rabota@mail.ru, <sup>3</sup> SAD-50@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В современных реалиях все более остро встает вопрос импортозамещения и модернизации существующего отечественного оборудования и систем управления во всех отраслях производства и промышленности РФ. Целью данной работы является поиск путей модернизации и усовершенствования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) бумажного производства на примере действующей бумагоделательной машины Пензенской бумажной фабрики ОАО «МАЯК». *Материалы и методы.* В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, методы цифровой обработки изображений, компьютерное моделирование. *Результаты.* Создана компьютерная модель АСУТП, регулирующая вес бумажного полотна на бумагоделательной машине. *Выводы.* Рассмотренные пути совершенствования АСУТП бумажного производства доказали свою состоятельность. Применение АСУТП с регулятором соотношения скоростей напуска бумажной массы на сетку и сеточного стола позволило повысить качество регулирования процессом, снизив влияние временного запаздывания на систему.

**Ключевые слова:** бумагоделательная машина, напорное устройство, вес бумажного полотна, регулятор, имитационная модель

**Для цитирования:** Ревунов М. С., Ревунов Д. С., Семенов А. Д. Повышение эффективности автоматизированной системы управления технологическим процессом регулирования массы бумажного полотна // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 17–23. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-2

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR REGULATING THE WEIGHT OF THE PAPER WEB

M.S. Revunov<sup>1</sup>, D.S. Revunov<sup>2</sup>, A.D. Semenov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC "MAYAK", Penza, Russia

<sup>1,2</sup> LTD "Promsystem", Penza, Russia

<sup>2</sup> SPC "Krug", Penza, Russia

<sup>3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> revunov\_rabota@mail.ru, <sup>3</sup> SAD-50@mail.ru

**Abstract.** *Background.* In modern realities, the issue of import substitution and modernization of existing domestic equipment and control systems in all branches of production and industry of the Russian Federation is becoming more acute. The purpose of this work is to find ways to modernize and improve the automated control system of paper production on the example of the current paper-making machine of the Penza paper mill of JSC "MAYAK". *Materials and methods.* The paper uses methods of modern theory of automatic control and automation of technological processes, methods of digital image processing, computer modeling. *Results.* A computer model of an automated process control system has been created that regulates the weight of a paper web on a paper machine. *Conclusions.* The considered ways of improving the automated process control system of paper production have proved their viability. The use of an automated process control system with a speed ratio regulator allowed to improve the quality of process control, reducing the effect of time lag on the system.

**Keywords:** paper-making machine, pressure device, paper web weight, regulator, simulation model

**For citation:** Revunov M.S., Revunov D.S., Semenov A.D. Improving the efficiency of the automated control system for regulating the weight of the paper web. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):17–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-2

### Объект управления

В зависимости от требуемых показателей качества бумажного полотна (вес, влажность, зольность и т.д.) операторы бумагоделательной машины (БДМ) по технологическим картам устанавливают задание уровня бумажной массы и давления «воздушной подушки» в напорном устройстве (НУ) [1–3], а также процент открытия граммового вентиля (в качестве начальных условий).

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) БДМ, регулирующая конечный вес бумажного полотна, включает в себя несколько взаимосвязанных контуров (рис. 1): контур поддержки заданного уровня бумажной массы в НУ; контур поддержки общего давления в НУ; контур регулирования скоростей приводов БДМ; контур управления массовой задвижкой [2, 4–7].

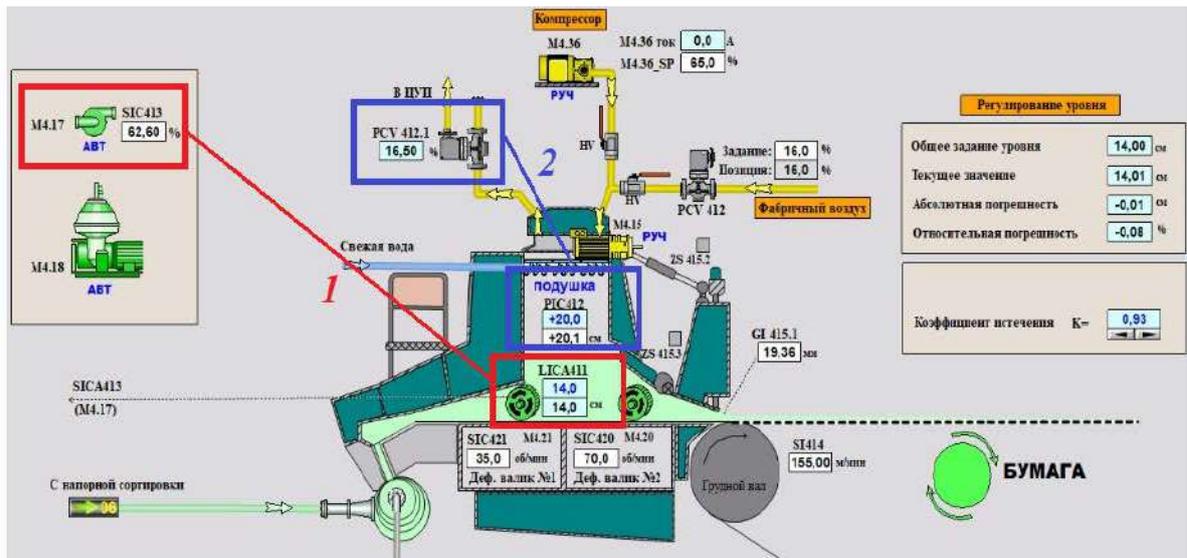


Рис. 1. Экран управления напорным устройством:

1 – контур управления уровнем массы в НУ; 2 – контур управления «воздушной подушкой»

При нормальных условиях эксплуатации и штатной работе БДМ первые три контура АСУТП имеют незначительные показатели временного запаздывания, что положительно сказывается на процессе регулирования веса бумаги. Иначе дело обстоит с контуром управления массовой задвижкой (рис. 2), так как исполнительный механизм расположен до НУ, считающегося «началом» БДМ, а управляющее воздействие формируется «на выходе» машины с помощью сканирующего устройства [1, 4, 6]. Таким образом, временное запаздывание системы может превышать десятки секунд.

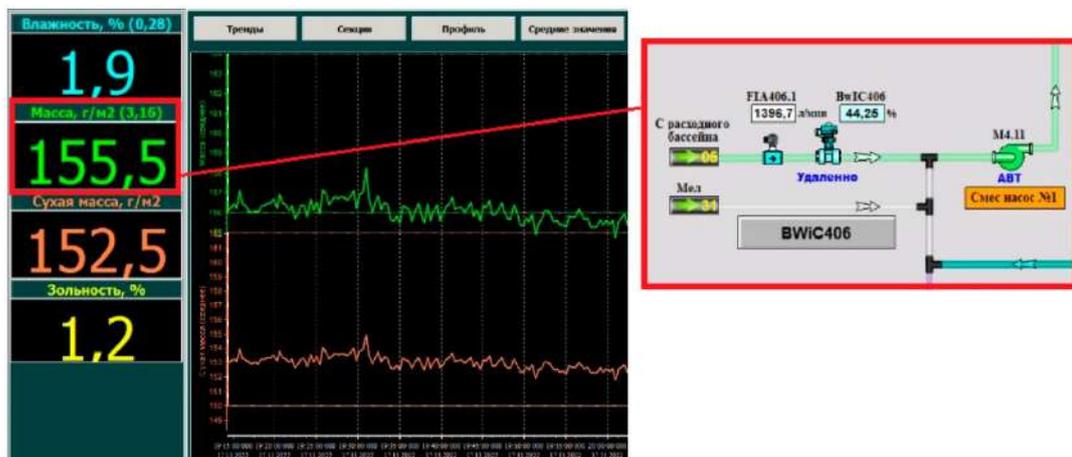


Рис. 2. Экран управления граммовым вентилем

В целях повышения качества регулирования, снижения дисперсии веса бумажного полотна, снижения перерасхода бумажной массы и брака конечной продукции предлагается ввести дополнительный контур регулирования соотношения скоростей напуска бумажной массы и сетки БДМ (рис. 3).

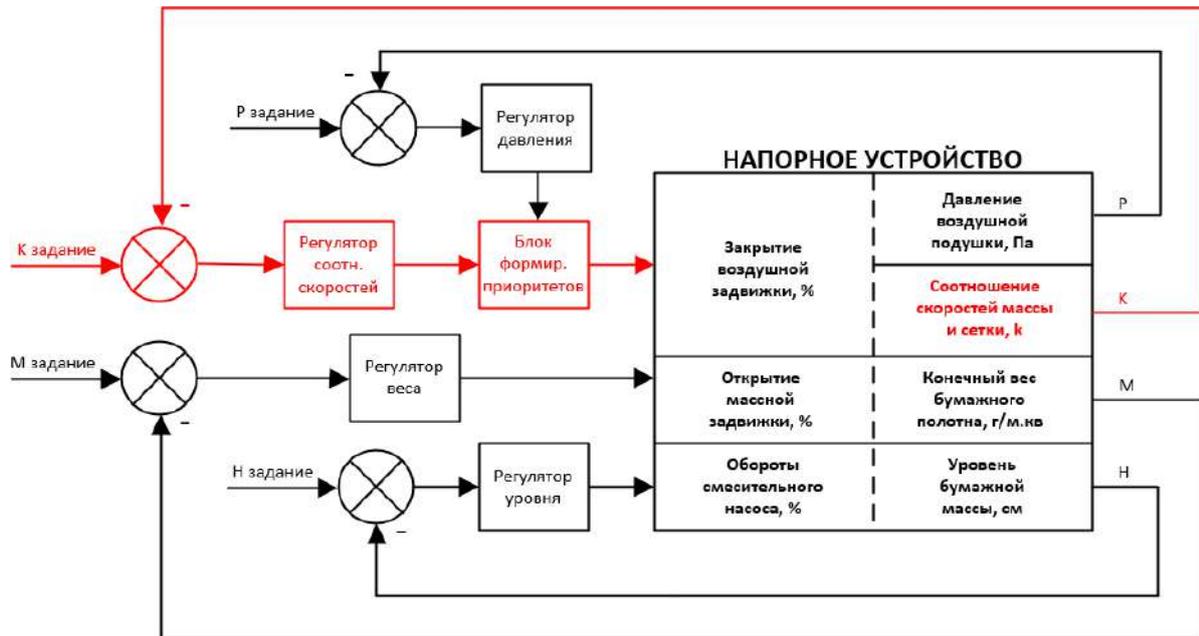


Рис. 3. Структурная схема системы управления процессом

### Моделирование АСУТП

Построение компьютерных моделей АСУТП (рис. 4, 5) осуществлялось с помощью графической среды имитационного моделирования *Simulink* на основе экспериментальных данных и инструментов пакета *System Identification Toolbox* [8–10].

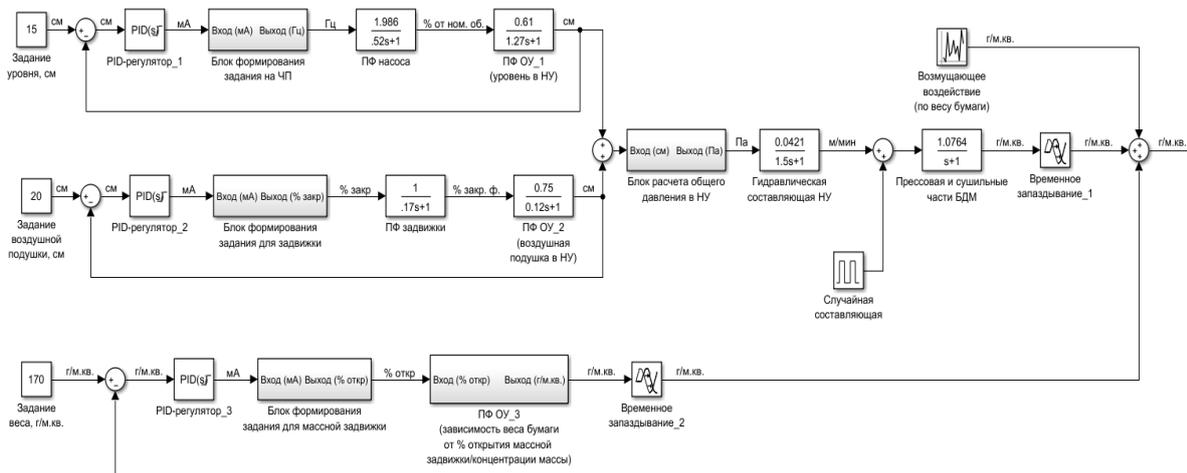


Рис. 4. Компьютерная модель действующей АСУТП, регулирующей вес бумажного полотна

Блок формирования приоритетов, необходимый для логической развязки регуляторов давления и соотношения скоростей, которые работают попеременно, реализован с помощью условных операторов и алгебры логики (рис. 6).

Для оценки динамических показателей качества регулирования были рассмотрены характеристики переходных процессов (реакций систем регулирования на скачкообразные и случайные входные воздействия) [10, 11]. Переходные характеристики представлены на рис. 7.

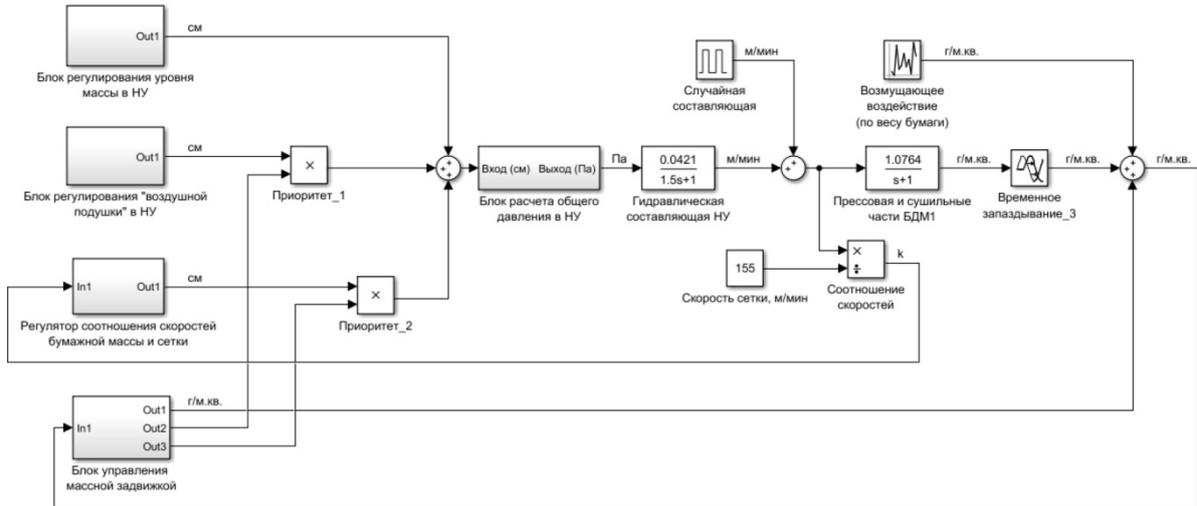


Рис. 5. Компьютерная модель АСУТП с регулятором соотношения скоростей напуска бумажной массы на сетку и сеточного стола БДМ



Рис. 6. Блок управления массовой задвижкой из рис. 5

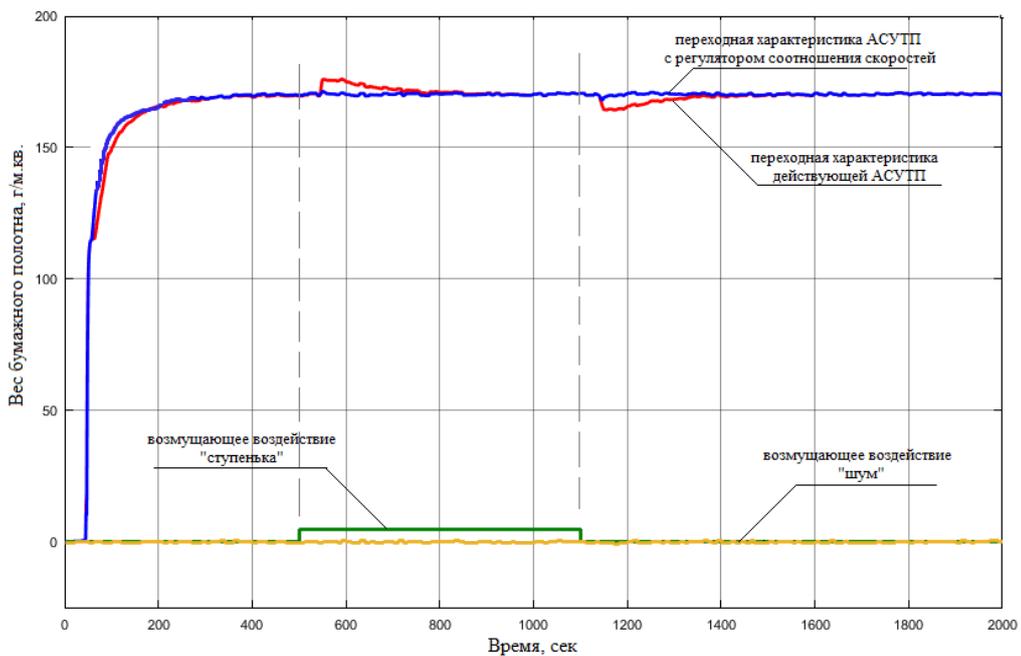


Рис. 7. Переходные характеристики моделей АСУТП

*Реализация контура регулирования соотношения скоростей*

Для внедрения в АСУТП дополнительного контура управления необходимо решить вопрос с бесконтактными измерениями скорости бумажной массы. Измерительный канал можно реализовать с помощью кросскорреляционного оптического вычислителя [12–15], а информацию о линейной скорости приводных точек БДМ получить от частотных преобразователей, связанных с ними (рис. 8).

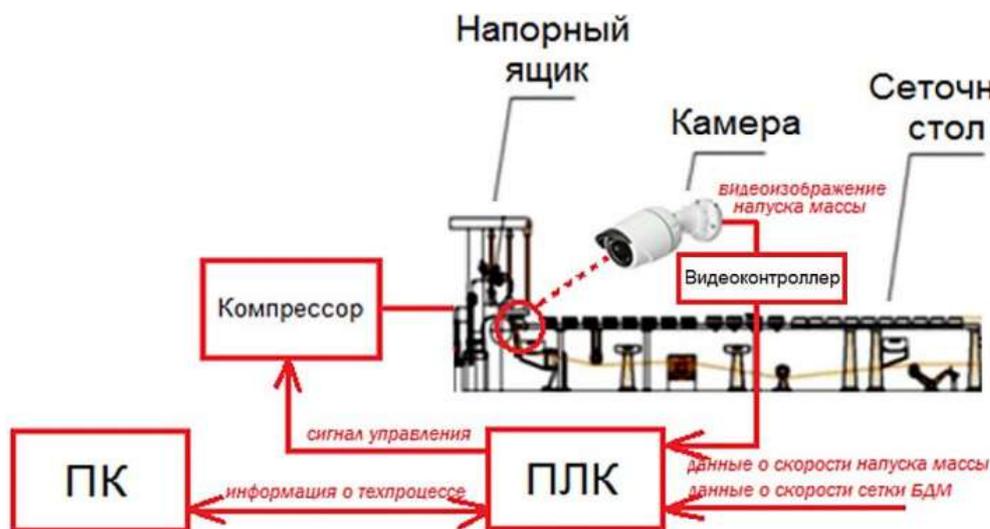


Рис. 8. Функциональная схема кросскорреляционного оптического вычислителя

Таким образом, в результате исследования удалось:

- по экспериментальным данным построить компьютерную модель действующей АСУТП регулирования веса бумажного полотна;
- повысить качество регулирования действующей АСУТП путем введения дополнительного контура управления (регулятора соотношения скоростей);
- провести апробацию и внедрение результатов исследования на реальном производстве ОАО «МАЯК» и ООО «Маяк-Техноцелл» при проектировании функциональных подсистем АСУТП БДМ (о чем свидетельствуют акты об использовании результатов диссертационной работы).

*Список литературы*

1. Фляте Д. М. Свойства бумаги : учеб. пособие. Краснодар : Лань, 2012.
2. Иванов С. Н. Технология бумаги. М. : Школа бумаги, 2006.
3. Вураско А. В., Агеев А. Я., Агеев М. А. Технология получения, обработки и переработки бумаги и картона : учеб. пособие. Екатеринбург : УГЛТУ, 2011. 281 с.
4. Зорин И. Ф., Петров В. П., Рогульская С. А. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства. М. : Лесная промышленность, 2008.
5. Revunov M. S., Semenov A. D., Nikulin S. V. Fuzzy extremal regulatory system with multidimensional input // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol : IOP Publishing, 2020. Vol. 709, iss. 2. doi:10.1088/1757-899X/709/2/022085
6. Гудвин Г. К., Гребе С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 911 с.
7. Ревунов М. С., Салмов Е. Н. Имитационные модели напорного устройства бумагоделательной машины // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11.
8. Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
9. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. М. : Инфра-Инженерия, 2008. 958 с.
10. Черных И. В. Simulink среда создания инженерных приложений. М. : Диалог-МИФИ, 2004. 491 с.
11. Янушевский Р. Т. Управление объектов с запаздыванием. М. : Наука, 1978. 416 с.
12. Артамонов Д. В., Семенов А. Д., Костюнин А. В., Куприянов И. В. Анализ спекловой картины для разработки алгоритма автоматической настройки оптических систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 42–54.

13. Алексеенко С. В., Бильский А. В., Маркович Д. М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 145–153.
14. Ревунов М. С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4. С. 24.
15. Андреев А. Н., Гаврилов Е. В., Ишанин Г. Г. [и др.]. Оптические измерения. М. : Университетская книга ; Логос, 2008. 416 с.

### References

1. Flyate D.M. *Svoystva bumagi: ucheb. posobie = Properties of paper : textbook*. Krasnodar: Lan', 2012. (In Russ.)
2. Ivanov S.N. *Tekhnologiya bumagi = Paper technology*. Moscow: Shkola bumagi, 2006. (In Russ.)
3. Vurasko A.V., Ageev A.Ya., Ageev M.A. *Tekhnologiya polucheniya, obrabotki i pererabotki bumagi i kartona: ucheb. posobie = Technology of obtaining, processing and processing paper and cardboard : textbook*. Ekaterinburg: UGLTU, 2011:281. (In Russ.)
4. Zorin I.F., Petrov V.P., Rogul'skaya C.A. *Upravlenie protsessami tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva = Management of pulp and paper production processes*. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 2008. (In Russ.)
5. Revunov M.S., Semenov A.D., Nikulin S.V. Fuzzy extremal regulatory system with multidimensional input. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 2020;709(2). doi:10.1088/1757-899X/709/2/022085
6. Gudvin G.K., Grebe S.F., Salgado M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya = Design of control systems*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2014:911. (In Russ.)
7. Revunov M.S., Salmov E.N. Simulation models of the pressure device of a paper-making machine. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*. 2020;(11). (In Russ.)
8. Philips Ch., Kharbor R. *Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'yu = Feedback control systems*. Moscow: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001:616. (In Russ.)
9. Fedorov Yu.N. *Spravochnik inzhenera po ASUTP: proektirovanie i razrabotka = Handbook of an engineer on automated control systems: design and development*. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2008:958. (In Russ.)
10. Chernykh I.V. *Simulink sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy = Simulink environment for creating engineering applications*. Moscow: Dialog-MIFI, 2004:491. (In Russ.)
11. Yanushevskiy R.T. *Upravlenie ob"ektov s zapazdyvaniem = Management of objects with a delay*. Moscow: Nauka, 1978:416. (In Russ.)
12. Artamonov D.V., Semenov A.D., Kostyunin A.V., Kupriyanov I.V. Speckle pattern analysis for the development of an algorithm for automatic tuning of optical systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2017;(2):42–54. (In Russ.)
13. Alekseenko S.V., Bil'skiy A.V., Markovich D.M. Application of the digital tracer visualization method for the analysis of turbulent flows with a periodic component. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and experimental techniques*. 2004;(5):145–153. (In Russ.)
14. Revunov M.S. Improvement of systems for stabilizing paper pulp flow parameters using a cross-correlation algorithm. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(4):24. (In Russ.)
15. Andreev A.N., Gavrilov E.V., Ishanin G.G. et al. *Opticheskie izmereniya = Optical measurements*. Moscow: Universitetskaya kniga; Logos, 2008:416. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Максим Сергеевич Ревунов

кандидат технических наук,  
технический директор,  
ООО «Промсистем»  
(Россия, г. Пенза, ул. Московская, 40);  
инженер отдела АСУТП,  
ОАО «МАЯК»  
(Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)  
E-mail: revunov\_rabota@mail.ru

#### Maksim S. Revunov

Candidate of technical sciences, technical director,  
LLC "Promsystem"  
(40 Moskovskaya street, Penza, Russia);  
engineer of the APCS department,  
OJSC "MAYAK"  
(1 Bumazhnikov street, Penza, Russia)

**Дмитрий Сергеевич Ревунов**

генеральный директор,  
ООО «Промсистем»  
(Россия, г. Пенза, ул. Московская, 40);  
заместитель технического директора,  
НПФ «Круг»  
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 1)  
E-mail: revunov\_rabota@mail.ru

**Dmitriy S. Revunov**

General director,  
LLC "Promsystem"  
(40 Moskovskaya street, Penza, Russia);  
deputy technical director,  
SPC "Krug"  
(1 Germana Titova street, Penza, Russia)

**Анатолий Дмитриевич Семенов**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
заведующий лабораторией цифровых  
информационно-управляющих систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: SAD-50@mail.ru

**Anatoly D. Semenov**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department  
of information and measuring equipment  
and metrology,  
head of the laboratory of digital  
information and control systems,  
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 20.10.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 23.12.2022**

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РАСТРОВЫЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов<sup>1</sup>, Е. А. Фокина<sup>2</sup>, Д. М. Марков<sup>3</sup>, И. Е. Смирнов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>2,3,4</sup> iit@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Современные датчики как источники информации определяют уровень качества информационно-измерительных и управляющих систем сложных производственно-технологических объектов, особенно в таких наукоемких областях, как энергетика, авиация, ракетно-космическая техника, вооружение и военная техника и др. Одной из задач при отработке ракетно-космических комплексов является измерение и контроль перемещений блоков механических систем. Существующие датчики перемещений неспособны одновременно измерять угловые и линейные перемещения. Для решения этой задачи разработан датчик перемещений, обладающий расширенными функциональными возможностями и способный одновременно измерять линейные и угловые перемещения. *Материалы и методы.* В работе был использован амплитудно-логический метод обработки модулированных сигналов с растрового датчика перемещений. В ходе выполнения работы были разработаны конструктивная схема многофункционального датчика перемещений и структурная схема вторичного преобразователя. *Результаты.* В результате проведенных исследований подтверждена возможность создания многофункционального датчика перемещений, работоспособного в широком в интервале температур 20 ÷ 600 °С, способного одновременно измерять линейные и угловые перемещения.

**Ключевые слова:** растровый датчик, угловое перемещение, вторичный преобразователь, шток, двоичный код

**Для цитирования:** Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. Многофункциональный растровый датчик перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 24–30. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-3

## MULTIFUNCTIONAL RASTER MOTION SENSOR

A.A. Trofimov<sup>1</sup>, E.A. Fokina<sup>2</sup>, D.M. Markov<sup>3</sup>, I.E. Smirnov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>2,3,4</sup> iit@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* Modern sensors as sources of information determine the level of quality of information-measuring and control systems of complex industrial-technological objects, especially in such science-intensive fields as power engineering, aviation, rocket-space technology, weapons and military equipment, etc. One of the tasks in the development of rocket-space systems is the measurement and control of movements of mechanical systems. The existing displacement sensors are not capable of simultaneous measurement of angular and linear movements. To solve this problem a displacement sensor was developed, which has extended functionality and is able to measure linear and angular movements simultaneously. *Materials and methods.* The amplitude-logic method of processing modulated signals from a raster displacement sensor was used in this work. In the course of the work, a design diagram of a multifunctional displacement sensor and a schematic diagram of the secondary converter were developed. *Results.* As a result of the conducted research, the possibility of creating a multifunctional displacement sensor capable of working in a wide temperature range of 20 ÷ 600 °C, capable of simultaneously measuring linear and angular movements was confirmed.

**Keywords:** raster sensor, angular motion, secondary transducer, rod, binary code

**For citation:** Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. Multifunctional raster motion sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):24–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-3

### Основная часть

Актуальной задачей при отработке новых типов изделий ракетно-космической и военной техники, создании систем автоматики и контроля технологических процессов в металлур-

гии, химической промышленности и других областях народного хозяйства является создание унифицированных датчиков перемещений, работоспособных при температурах окружающей среды от минус 60 до 200 °С, обладающих высокой стабильностью, точностью измерений и надежностью [1–3].

Важное место в общей номенклатуре первичных преобразователей перемещений занимают электромагнитные, а именно взаимоиндуктивные (трансформаторные), датчики перемещений [4–6]. Они отличаются такими достоинствами, как высокая надежность в жестких условиях эксплуатации, относительно малый вес, широкий диапазон измеряемых перемещений, линейность функции преобразования, отсутствие гальванической связи между цепями питания и измерительными цепями, достаточно высокая точность измерений, простота в изготовлении и эксплуатации.

Совершенствования технических характеристик трансформаторных датчиков перемещений удалось добиться при использовании в их конструкции растровых комбинационных сопряжений [7, 8].

Существующие датчики перемещений неспособны одновременно измерять угловые и линейные перемещения.

Разработанный растровый датчик перемещений не имеет указанного недостатка, обладает расширенными функциональными возможностями, способен одновременно измерять линейные и угловые перемещения. Конструктивная схема датчика приведена на рис. 1.

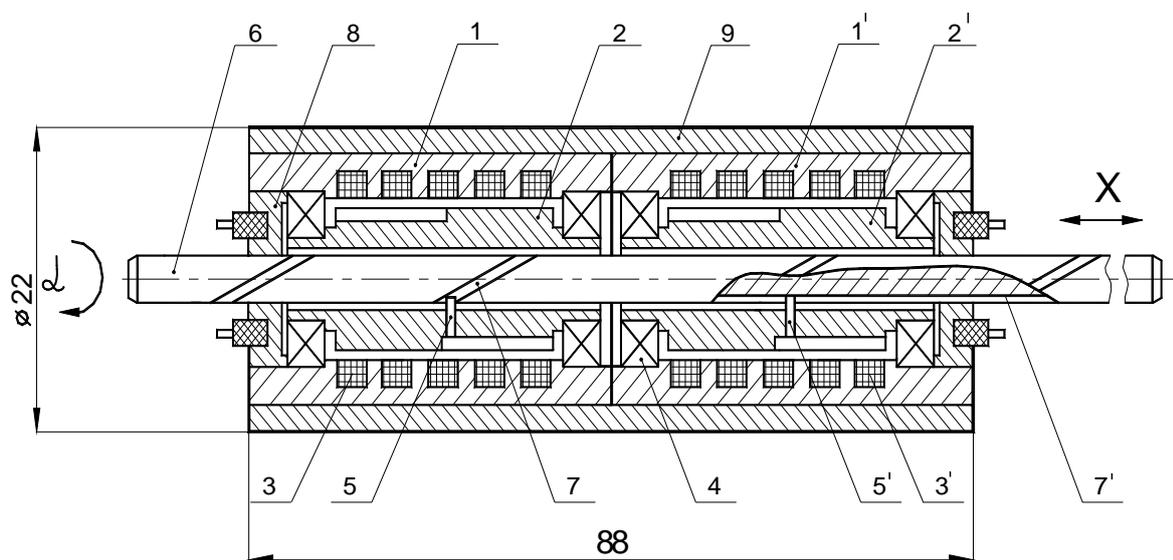


Рис. 1. Общий вид датчика перемещений

Датчик содержит две пары цилиндрических ферромагнитных зубчатых элементов 1; 2 и 1'; 2'. Во внешних зубчатых элементах расположены обмотки возбуждения и считывания 3 и 3'. Внутренние зубчатые элементы 2 и 2' установлены в подшипниках качения 4 и имеют жестко закрепленные на них щупы 5 и 5', противоположные концы которых входят в профилированные канавки, нарезанные на поверхности штока 6. Канавка 7, взаимодействующая со щупом 5, нарезана на штоке по винтовой линии, а канавка 7', взаимодействующая со щупами 5 и 5', нарезана по образующей штока. Шток закреплен в подшипниках скольжения 8. Внешние ферромагнитные зубчатые элементы крепятся в корпусе 9.

При наличии только углового перемещения объекта измерения шток поворачивает оба внутренних зубчатых элемента и в обмотках считывания обоих каналов формируются равные по величине выходные сигналы пропорциональные угловому перемещению. После вычитания  $U_L - U_\alpha$  сигнал с канала линейных перемещений равен 0, где  $U_L$  – выходной сигнал с канала линейных перемещений;  $U_\alpha$  – выходной сигнал с канала угловых перемещений.

В случае линейного перемещения объекта измерения шток воспринимает контролируемое перемещение объекта и с помощью щупа, взаимодействующего с винтовой канавкой, по-

ворачивает внутренний зубчатый элемент канала линейных перемещений, при вращении которого в обмотках формируется сигнал пропорциональный линейному перемещению штока; при этом внутренний ферромагнитный элемент канала угловых перемещений остается неподвижным, так как шуп скользит по канавке, направление нарезки которой совпадает с направлением движения штока.

Когда одновременно происходит линейное и угловое перемещение объекта измерения, в обмотках считывания канала линейных перемещений формируется выходной сигнал (рис. 2), величина которого зависит от линейного и углового перемещений, а в обмотках канала углового перемещения выходной сигнал зависит только от углового перемещения штока. Для определения линейного перемещения необходимо из сигнала с канала линейных перемещений вычесть сигнал с канала угловых перемещений.

При использовании амплитудно-логического метода обработки может быть осуществлено «опознавание» участков  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_i$  внутри периода соответствующего шагу зубцового сопряжения. Например, на участке  $D_3$ :

$$U_1 > U_2 > U_4 > U_3,$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_4$ ,  $U_3$  – выходные напряжения с обмоток канала линейных перемещений.

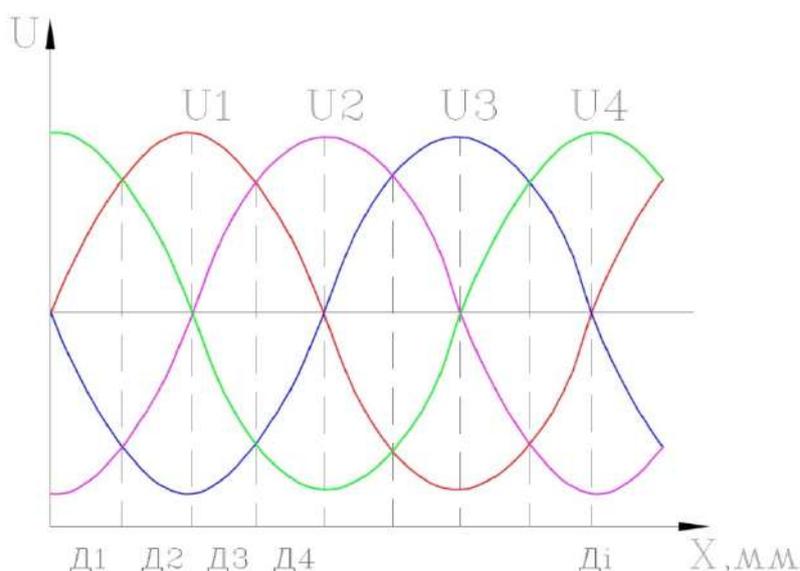


Рис. 2. Выходные напряжения с обмоток канала линейных перемещений

Далее происходит последовательный счет периодов. Вид выходных сигналов и метод их обработки с канала угловых перемещений аналогичны вышеприведенному по каналу линейных перемещений.

Отличительной особенностью всех разработанных растровых трансформаторных датчиков перемещений независимо от типа сопряжения (спиральный или цилиндрический растр), конструктивного исполнения и диапазонов измерений является идентичность выходных сигналов, что позволило разработать для всех конструктивных исполнений растровых датчиков линейных и угловых перемещений унифицированный вторичный преобразователь (ВП) на отечественной элементной базе.

ВП предназначен для преобразования сигналов, поступающих с чувствительного элемента в четырнадцатиразрядный цифровой код: три разряда – позиционные, остальные – накапливающие.

Преобразователь конструктивно выполнен на трех платах. Монтаж плат печатный. Платы помещены в общий герметичный корпус, заполненный сухим азотом. На одной плате расположен канал измерительный (КИ); на второй – устройство питания датчика (УПД), формирователь импульса синхронизации (ФСИ), формирователь импульса сопровождения информации (ФИСИ); на третьей – блок питания (БП).

Принцип действия блока основан на сравнении по амплитуде сигналов с четырех измерительных обмоток датчика, величина которых в зависимости от перемещения изменяется по закону:

$$\begin{aligned} U1(X) &= n_1 U_{\pi} (1 + m_m \cos(2\pi X / q)), \\ U2(X) &= n_2 U_{\pi} (1 + m_m \sin(2\pi X / q)), \\ U3(X) &= n_3 U_{\pi} (1 - m_m \cos(2\pi X / q)), \\ U4(X) &= n_4 U_{\pi} (1 - m_m \sin(2\pi X / q)), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X$  – величина перемещения в физических величинах;  $U_{\pi}$  – падение напряжения в питающей обмотке;  $n_i$  – коэффициент трансформации обмотки;  $m_m$  – глубина модуляции;  $U1 \div U4$  – амплитуда выходных сигналов;  $q$  – шаг зубцового сопряжения.

Сигналы с датчика периодические, их период равен шагу зубцового сопряжения датчика. ВП сравнивает между собой аналоговые сигналы с датчика внутри шага  $q$  и формирует трехразрядный двоичный (позиционный) код в зависимости от результата сравнения. Последующие 8 разрядов кода формируются путем подсчета числа интервалов, пройденных от точки, принятой за начало отсчета.

Функциональная схема ВП представлена на рис. 3. В ее состав входят: четыре сравнивающих устройства (СУ1÷СУ4); четыре запоминающих устройства (ЗУ1÷ЗУ4); дешифратор позиционного кода (ДПК); формирователь импульса счета (ФИС); формирователь импульса синхронизации (ФСИ), идентификатор направления перемещения (ИНП); формирователь импульса сопровождения информации (ФИСИ); реверсивный счетчик (РС); схема формирования контрольного разряда (СФКР); выходные формирователи уровней (ВФУ); генератор тактовой частоты (ГТЧ); цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); фильтр низкой частоты (ФНЧ); преобразователь «напряжение–ток» (ПНТ); предварительный стабилизатор напряжения (ПСН); регулирующий транзистор (РТ); двухтактный преобразователь напряжения (ДПН); выпрямители напряжения (ВН1, ВН2); каналные стабилизаторы напряжения (КСН1, КСН2).

ВП работает следующим образом. Ток синусоидальной формы поступает на обмотку питания датчика, создавая в его магнитопроводе магнитный поток, изменение которого вызывает ЭДС в измерительных обмотках датчика. Сигналы с четырех измерительных обмоток датчика ( $U1 \div U4$ ) поступают на вход ВП. Напряжения ( $U1 \div U4$ ) сравниваются между собой по амплитуде СУ1÷СУ4. На выходах СУ формируются логические уровни «1», если разность входных сигналов положительна, или «0», если разность входных сигналов отрицательна.

Логические уровни с СУ переписываются в ЗУ1÷ЗУ4 по переднему фронту импульса синхронизации (СИ) и хранятся там до прихода следующего СИ.

ДПК преобразует четырехразрядный двоичный код с ЗУ1÷ЗУ4 в 3-разрядный двоичный (позиционный) код.

Сигналы с ДПК поступают на ФИС. ФИС выдает импульсы счета на РС при переходе от одного интервала к другому, т.е. когда код в ДПК меняется с 111 на 000 или с 000 на 111.

Работа ФИС описывается следующими логическими уровнями:

$$S_1 = S_{\phi_1}(P1P2P3); S_2 = S_{\phi_2}(P1P2P3),$$

где  $S_{\phi_1}$  – короткий импульс, сформированный по фронту импульса  $P1P2P3$ ;  $S_{\phi_2}$  – короткий импульс, сформированный по фронту импульса  $P1P2P3$

ИНП указывает направление перемещения ротора датчика. При изменении штока в ДПК с 111 на 000, т.е. при прямом перемещении штока (ротора) датчика состояние ИНП соответствует логической «1». При изменении кода в ДПК с 000 на 111, т.е. при обратном перемещении штока (ротора) датчика состояние ИНП соответствует логическому «0». Пересчет импульсов с ФИС осуществляет РС. Причем в зависимости от сигнала с ИНП (логическая «1» или логический «0») РС работает в режиме сложения либо в режиме вычитания. Сигналы с выхода ДПК и РС (выходной код) поступают на вход СФКР. СФКР представляет собой схему сложения по модулю. Контрольный разряд (КР) равен «1» при четном количестве «1» в выходном коде и равен «0» при нечетном количестве «1» в выходном коде. УПД обеспечивает

питание датчика стабильным током синусоидальной формы и включает в свой состав генератор напряжения синусоидальной формы и преобразователь «напряжение–ток». Генератор синусоидального напряжения состоит из ГТЧ, 8-разрядного ЦАП и ФНЧ. ФСИ предназначен для формирования последовательности импульсов синхронизации (СИ), которая обеспечивает общей синхронизацией от УПД датчик и блок. ФИСИ формирует импульс сопровождения информации (ИСИ). ИСИ определяет момент времени, когда можно считывать выходное слово с выходных шин блока.

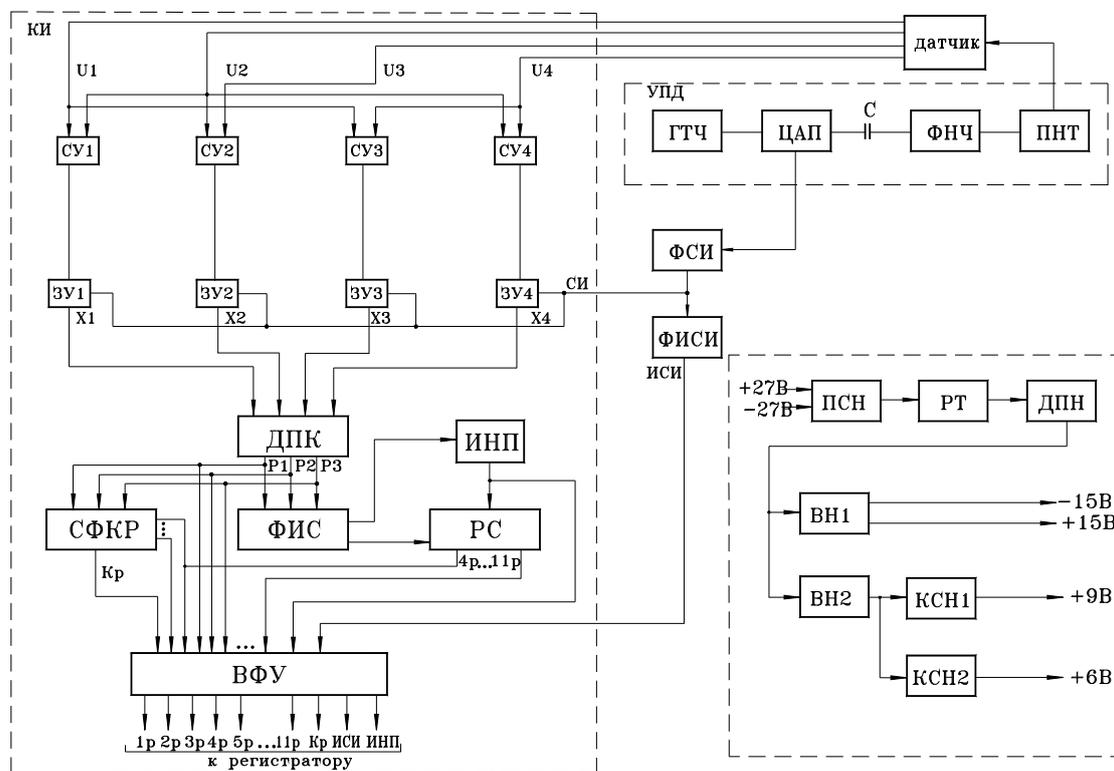


Рис. 3. Функциональная схема ВП для растровых взаимоиндуктивных датчиков перемещений

Шток (ротор) датчика в процессе измерения перемещения осуществляет угловое перемещение. Выходной код блока то возрастает, то убывает. За начальную точку отсчета принимается значение трех младших разрядов выходного кода (позиционный код) после подачи напряжения питания и сигнала СБРОС на блок. Сигнал СБРОС подается нулевым уровнем. На вход ВФУ поступает позиционный код с выхода ДПК, 11-разрядный код с выхода РС, ИСИ, КР, ИНП. ВФУ обеспечивает согласование уровней выходных сигналов блока с регистрирующей аппаратурой. БП обеспечивает необходимыми питающими напряжениями. В его состав должны входить ПСН, РТ, ДПН, ВН1, ВН2, КСН1, КСН2 (табл. 1).

Таблица 1

Основные технические характеристики многофункционального датчика перемещений

Наименование	Значение
Диапазон измерений: угловое перемещение линейное перемещение	0–360° 0–30, 0–45, 0–60, 0–90, 0–125, 180, 0–250, 0–350, 0–700 мм
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,2
Выходной сигнал	последовательный двоичный код
Рабочая температура, °С	от минус 60 до 200
Масса, кг	0,75 max (со штоком)
Вибрация, g	40
Частота, Гц	5...5000 Гц

В результате проведенных исследований подтверждена возможность создания многофункционального датчика перемещений, работоспособного в широком диапазоне температур, способного одновременно измерять линейные и угловые перемещения.

#### Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А.А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
2. 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.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
4. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
5. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
6. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М. : Машиностроение, 1987.
7. Трофимов А. Н., Блинов А. В., Трофимов А. А. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 24–29.
8. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.

#### References

1. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and on their basis measurement systems, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(3):18–25. (In Russ.)
4. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
6. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevskiy M.L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin = Electromagnetic sensors of mechanical quantities*. Moscow: Mashinostroenie, 1987. (In Russ.)
7. Trofimov A.N., Blinov A.V., Trofimov A.A. Unified series of high-temperature raster electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(7):24–29. (In Russ.)
8. Trofimov A.N., Trofimov A.A. Rasshiren timeraturnogo diapazona rastroykh transformatornykh datchikov peremeshcheniy. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2009;(6):24–27. (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)

##### Екатерина Александровна Фокина

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

##### Ekaterina A. Fokina

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

**Дмитрий Максимович Марков**

аспирант,

Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

**Dmitry M. Markov**

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Иван Евгеньевич Смирнов**

аспирант,

Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

**Ivan E. Smirnov**

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 24.10.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 26.12.2022**

УДК 681.586.78  
doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов<sup>1</sup>, Е. А. Фокина<sup>2</sup>, Д. М. Марков<sup>3</sup>, И. Е. Смирнов<sup>4</sup>, В. Н. Пономарев<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>2,3,4,5</sup> iit@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время эффективность развития и эксплуатации современных автоматизированных систем контроля и управления различными технологическими процессами во многом определяется технико-экономическими характеристиками первичных преобразователей информации (датчиками), среди которых важное место занимают датчики перемещений. Рассмотрена математическая модель взаимноиндуктивных датчиков линейных перемещений, лежащая в основе алгоритма расчета, разработанная на основе решения краевой электродинамической задачи взаимодействия однородного переменного поля с электромагнитным штоком. *Материалы и методы.* В работе были использованы системы уравнений Пуассона и Лапласа относительно векторного потенциала. *Результаты.* В результате проведенных исследований предложена математическая модель, которая использована при разработке трансформаторного датчика перемещений, предназначенного для измерения перемещений солнечных батарей спутникового аппарата в условиях открытого космоса.

**Ключевые слова:** датчик, математическая модель, перемещение, электромагнитное поле, чувствительный элемент

**Для цитирования:** Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е., Пономарев В. Н. Математическая модель трансформаторного датчика линейных перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 31–37. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

## MATHEMATICAL MODEL OF A TRANSFORMER LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

A.A. Trofimov<sup>1</sup>, E.A. Fokina<sup>2</sup>, D.M. Markov<sup>3</sup>, I.E. Smirnov<sup>4</sup>, V.N. Ponomarev<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>2,3,4,5</sup> iit@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* At present, the efficiency of development and operation of modern automated systems of control and management of various technological processes is largely determined by the technical and economic characteristics of the primary transducers of information (sensors) among which the important place belongs to displacement sensors. The mathematical model of mutual inductive linear displacement sensors underlying the calculation algorithm developed on the basis of the solution of the boundary electrodynamic problem of interaction of a homogeneous alternating field with an electromagnetic rod is considered. *Materials and methods.* The systems of Poisson's and Laplace's equations with respect to the vector potential were used in this work. *Results.* As a result of this research, a mathematical model was proposed, which was used in the development of the TDS designed to measure the movements of the solar panels of a satellite vehicle in open space conditions.

**Keywords:** sensor, mathematical model, displacement, electromagnetic field, sensing element

**For citation:** Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E., Ponomarev V.N. Mathematical model of a transformer linear displacement sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):31–37. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-4

Совершенствование информационно-измерительных систем, систем автоматического управления и контроля во многом обусловлено достижениями в области датчиков [1–3], метрологические и надежность характеристики которых определяют достоверность контролируемой информации и обеспечивают качество работы систем в целом.

Среди большого разнообразия требований, предъявляемых к датчикам перемещений, работоспособным в жестких условиях эксплуатации, основными являются требования по

обеспечению высокой точности преобразования, длительного ресурса и метрологической надежности, под которой в соответствии понимается надежность средства измерения в части сохранения его метрологической исправности, т.е. в конечном счете сохранение метрологических характеристик в течение назначенного ресурса. Следующими требованиями, предъявляемыми при разработке датчиков перемещений, являются требования конструктивного характера. Прежде всего, это минимальные габаритные размеры и вес, простота конструкции и технологичность ее изготовления. Под технологичностью понимают оптимальный путь изготовления для данного производства.

Учитывая жесткие условия, в которых эксплуатируются датчики перемещений специального назначения, к ним предъявляются требования по устойчивости их метрологических характеристик к внешним воздействующим факторам, таким как вибрация, ударные ускорения, влажность, широкий температурный диапазон. К эксплуатационным требованиям также необходимо отнести удобство монтажа и демонтажа в системе, удобство консервации и расконсервации, ремонтпригодность.

Трансформаторные датчики перемещений (ТДП) используются для измерения линейных перемещений в диапазонах от миллиметра до нескольких десятков сантиметров [4–6]. Для измерения линейных перемещений до 5 мм может быть использован ТДП (рис. 1), в котором электромагнитное поле создается катушкой соленоидного типа 1, а подвижный элемент – шток 2 с ферромагнитной вставкой 3 перемещается внутри обмотки питания. Выходной сигнал с измерительной обмотки 4 определяется положением ферромагнитной вставки 3. Оптимизация конструкции ТДП применительно к задаче измерения линейных перемещений сводится к выбору размеров подвижного элемента, количества и координат расположения измерительных обмоток 4, реализующих выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки: преобразования перемещений в код, подавления воздействия внешних дестабилизирующих факторов и т.п.

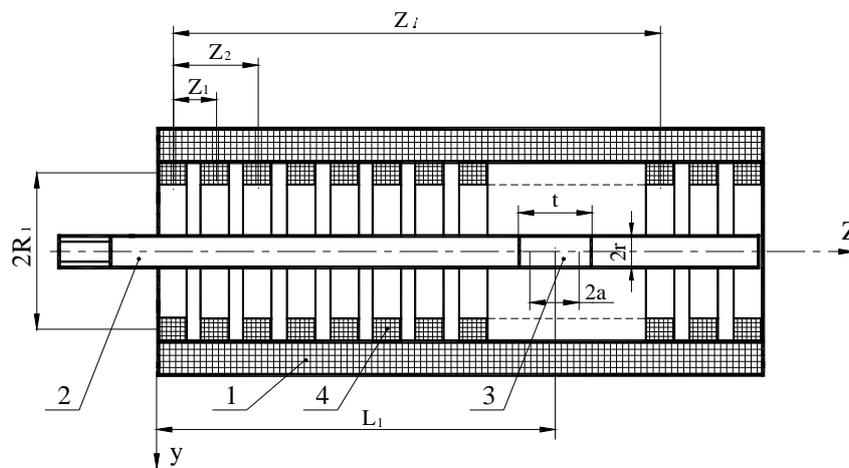


Рис. 1. Расчетная модель ТДП

Для решения поставленной задачи оптимизации конструктивного исполнения ТДП необходимо разработать математическую модель датчика, позволяющую исследовать перечисленные вопросы и допускающую варьирование основных внешних влияющих факторов в широком диапазоне их изменения.

Проведя анализ конструкции ТДП, можно сделать следующие допущения, упрощающие разработку математической модели: выходной сигнал ТДП определяется положением ферромагнитной вставки 3; подвижный элемент датчика – шток 2 – находится в однородном переменном магнитном поле  $H_0 \cdot e^{j\omega t}$ , направленном вдоль оси ТДП. Такое допущение правомерно, так как поле внутри возбуждающей катушки достаточно однородно, вставку 3 можно представить в виде вытянутого эллипсоида вращения (сфероида). Таким образом, математическая модель ТДП может быть разработана на основе решения краевой электродинамической задачи по расчету взаимодействия однородного переменного магнитного поля с вытянутым ферромагнитным сфероидом.

Учитывая выбранную геометрию подвижного элемента, решение поставленной задачи осуществляется в системе вытянутых сфероидальных координат  $\xi, \eta, \Phi$ , используя при этом результаты работы [7]. Электромагнитное поле системы «ферромагнитный сфероид в однородном переменном магнитном поле» описывается системой уравнений Пуассона и Лапласа относительно векторного потенциала:

$$\Delta \overline{A}_B = -\mu_0 j_{CT}; \Delta \overline{A}_\Phi = 0, \quad (1)$$

где  $\overline{A}_B$  – векторный потенциал поля в воздухе;  $\overline{A}_\Phi$  – векторный потенциал поля в ферромагнитном сфероиде;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $j_{CT}$  – плотность стороннего тока;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха.

В системе вытянутых сфероидальных координат уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{a^2(\xi - \eta)} \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \left( (\xi^2 - 1) \frac{\partial A_B}{\partial \eta} \right) \right) - \frac{A_B}{a^2(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} = -\mu_0 j_{CT};$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( (\xi^2 - 1) \frac{\partial A_\Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( (1 - \eta^2) \frac{\partial A_\Phi}{\partial \eta} \right) - \frac{A_\Phi}{1 - \eta^2} - \frac{A_\Phi}{\xi^2 - 1} = 0,$$

где  $A_B$  и  $A_\Phi$  –  $\Phi$  компоненты векторных потенциалов  $\overline{A}_B$  и  $\overline{A}_\Phi$ , остальные составляющие которых равны нулю в силу осесимметричности поля;  $2a$  – межфокусное расстояние сфероидальной системы координат.

Векторный потенциал в воздухе представим в виде суперпозиции

$$\overline{A}_0 + \overline{A}_p = \overline{A}_B, \quad (2)$$

где  $\overline{A}_0$  – векторный потенциал однородного магнитного поля;  $\overline{A}_p$  – векторный потенциал поля реакции, обусловленный намагничённостью сфероида.

Функция  $A_0$  является частным решением уравнения Пуассона и имеет следующий вид:

$$A_0 = -\frac{1}{2} \mu_0 \cdot H_0 \cdot a \cdot P_1^1(\xi) \cdot P_1^1(\eta), \quad (3)$$

где  $P_1^1$  – присоединительный полином Лежандра 1-го рода.

Векторный потенциал реакции сфероида является общим в решении уравнения Лапласа и выбирается с учетом условия равенства нулю  $A_p$  на бесконечности

$$A_p = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot P_n^1(\xi) \cdot Q_n^1(\eta), \quad (4)$$

где  $Q_n^1$  – присоединительные полиномы Лежандра 2-го рода;  $C_n$  – постоянные интегрирования.

Вектор-потенциал внутри ферромагнитного сфероида также удовлетворяет уравнению Лапласа и его решение строится с учетом регулярности в замкнутой области:

$$A_\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot P_n^1(\xi) \cdot P_n^1(\xi) \cdot P_n^1(\eta), \quad (5)$$

где  $B_n$  – постоянные интегрирования.

Коэффициенты  $C_n$  и  $B_n$  определим из граничных условий

$$A_\Phi = A_B; \frac{\partial(A_B \sqrt{\xi^2 + 1})}{\partial \xi} = \frac{1}{\mu_\Phi} \cdot \frac{\partial(A_\Phi \sqrt{\xi^2 + 1})}{\partial \xi}; \xi = \xi_2, \quad (6)$$

где  $\mu_\phi$  – относительная магнитная проницаемость материала вставки;  $\xi_2$  – сфероидальная координата, определяющая поверхность вставки.

Подставляя аналитические выражения (2)–(5) в граничные условия (6), получим  $C_n = B_n = 0$  для  $n > 1$ . Для определения коэффициентов  $C_1$  и  $B_1$  получим систему линейных уравнений, которая в матричной форме запишется так:

$$\begin{vmatrix} Q_1^1(\xi) & -P_1^1(\xi) \\ \mu_\phi \cdot Q_1(\xi_2) & -P_1(\xi_2) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} C_1 \\ B_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2} \mu_0 \cdot a \cdot H_0 \cdot P_1^1(\xi) \\ \frac{1}{2} \mu_0 \cdot \mu_\phi \cdot a \cdot H_0 \cdot P_1(\xi_2) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где  $P_1(\xi_2)$  и  $Q_1(\xi_2)$  – полиномы Лежандра 1-го и 2-го рода.

Решая матричное уравнение (7), получим коэффициенты  $C_1, B_1$ :

$$C_1 = \frac{1}{2} \mu_0 H_0 a (\mu_\phi - 1) \frac{P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2) - P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2)}{\mu_\phi P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2) - P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2)};$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_\phi H_0 a \frac{P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2) - P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2)}{\mu_\phi P_1^1(\xi_2) Q_1(\xi_2) - P_1(\xi_2) Q_1^1(\xi_2)}.$$

Рассчитанные коэффициенты  $C_1$  и  $B_1$  определяют векторные потенциалы полей  $A_\phi$  и  $A_\phi$  в воздухе и подвижном ферромагнитном элементе.

Полученные аналитические выражения являются основой построения ТДП и позволяют построить его выходную характеристику при различных конструкциях измерительной обмотки, а также исследовать влияние размеров формы и электрофизических свойств подвижного элемента на выходные сигналы датчика.

ТДП (рис. 1) содержит в общем случае  $N$  измерительных обмоток  $4$ , используя которые, возможно промоделировать различные конструкции датчика. Положение этих обмоток вдоль оси  $z$  определяется координатами  $z_1, z_2, \dots, z_N$ . Первая обмотка совмещена с началом координат  $z = 0$ . Положение подвижного элемента на оси задается координатой  $L_1$ , где  $0 \leq L_1 \leq L$ . Напряжение, вносимое в  $i$ -ю измерительную обмотку, определим следующим образом:

$$U_{\text{вн}}(L_1, R_i, z_i) = W_i \oint_{2\pi R_i} \bar{E}_P d\bar{l}, \quad \bar{E}_P = -j\omega A_P(L_1, z_i),$$

где  $\bar{E}_P$  – напряженность электрического поля реакции ферритового сфероида;  $W_i, z_i, R_i$  – число витков, координата и радиус  $i$ -й обмотки.

Используя выражение (4) для вектор-потенциала поля реакции и учитывая асимметричность поля, получим

$$U_{\text{вн}}(L_1, R_i, z_i) = -j\omega 2\pi \cdot R_i \cdot C_1 \cdot P_1^1(\eta_i) \cdot Q_1^1(\xi_i),$$

где  $\eta_i$  и  $\xi_i$  – сфероидальные координаты  $i$ -й измерительной обмотки.

Заменяя полиномы Лежандра  $P_1^1(\eta_i)$  и  $Q_1^1(\xi_i)$  их аналитическими выражениями, получим аналитическое выражение для напряжения  $U_{\text{вн}}$ , вносимого в  $i$ -ю измерительную обмотку ТДП:

$$U_{\text{вн}} = j\omega W_i \pi R_i \mu_0 (\mu_\phi - 1) H_0 a C_0 \xi_i \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2}{\xi_i^2 - 1}} - j\omega W_i 0,5 \pi R_i \mu_0 (\mu_\phi - 1) H_0 a C_0 \sqrt{(\xi_i^2 - 1) \cdot (1 - \eta_i^2)} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1},$$

$$\text{где } C_0 = \frac{P_1(\xi_2) \cdot P_1^1(\xi_2)}{\mu_\phi \cdot P_1^1(\xi_2) - P_1(\xi_2) \cdot Q_1^1(\xi_2)}.$$

Последнее уравнение можно представить в нормированном виде, удобном для численного анализа, через безразмерные коэффициенты, характеризующие электрические и конструктивные параметры трансформаторного датчика:

$$F_i(\alpha)_i = \gamma_i \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1} \cdot (\mu_\phi - 1) \cdot C_0 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2}{\xi_i^2 - 1}} - \frac{1}{2} \gamma_i \sqrt{\lambda^2 - 1} \cdot (\mu_\phi - 1) \cdot C_0 \sqrt{(\xi_i^2 - 1) \cdot (1 - \eta_i^2)} \ln \frac{\xi_i + 1}{\xi_i - 1}.$$

Сфероидальные координаты  $\xi_i$ ,  $\eta_i$  рассмотрим как функции  $z_i$  и  $L_1$ . Они вычисляются с помощью уравнений связи сфероидальной и декартовой систем координат и записываются через безразмерные переменные следующим образом:

$$\eta_i = \frac{\sqrt{2}(x_i - \alpha)^2}{\sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} + \sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2};$$

$$\xi_i = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} + \sqrt{1 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2} - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_i - \alpha)^2}{\sqrt{2\varepsilon} \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1}}.$$

В последних трех уравнениях использованы следующие обозначения:

$$\lambda = \frac{t}{2r}; \frac{a}{R} = \varepsilon \sqrt{\lambda^2 - 1}; \varepsilon = \frac{r}{R}; \alpha = \frac{L_1}{R}; x_i = \frac{z_i}{R}; H = \frac{L}{R}; \gamma_i = \frac{W_i}{W}; F(\alpha)_i = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_0};$$

$$U_0 = j\omega\pi \cdot R^2 \cdot B_0 \cdot W; \xi_2 = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}}; B_0 = \mu_0 \cdot H_0.$$

Выходной сигнал ТДП определим как отношение напряжения, наводимого в измерительных обмотках, к напряжению на компенсационной обмотке, содержащей секции, включенные последовательно-встречно и содержащие одинаковое число витков  $\gamma$ . Выходной сигнал данной обмотки не зависит от перемещения  $\alpha$ , а определяется только размерами и электрофизическими свойствами подвижного элемента. Положим вначале  $\gamma = 1$ , тогда выходной сигнал с компенсационной обмотки равен

$$U_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\varphi}_i(\alpha, x_i).$$

Выходное напряжение ТДП определяется следующим образом:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^N \gamma_i \psi_i(\alpha, x_i); \psi_i(\alpha, x_i) = \frac{\varphi_i(\alpha, x_i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{\varphi}_n(\alpha, x_n)}. \quad (8)$$

Функции  $\varphi_i(\alpha, x_i)$  и  $\dot{\varphi}_n(\alpha, x_n)$  находятся в соответствии с полученными выше выражениями:

$$\varphi_i(\alpha, x_i) = -\xi_i(\alpha, x_i) \sqrt{\frac{1 - \eta_i^2(\alpha, x_i)}{\xi_i^2(\alpha, x_i) - 1}} + \frac{1}{2} \sqrt{(1 - \eta_i^2(x_i, \alpha))(\xi_i^2(\alpha, x_i) - 1)} \ln \frac{\xi_i(\alpha, x_i) + 1}{\xi_i(\alpha, x_i) - 1};$$

$$\dot{\varphi}_n(\alpha, x_n) = -\bar{\xi}_n(\alpha, x_n) \sqrt{\frac{1 - \eta_n^2(\alpha, x_n)}{\xi_n^2(\alpha, x_n) - 1}} + \frac{1}{2} \sqrt{(1 - \eta_n^2(\alpha, x_n))(\xi_n^2(\alpha, x_n) - 1)} \ln \frac{\xi_n(\alpha, x_n) + 1}{\xi_n(\alpha, x_n) - 1},$$

где

$$\bar{\xi}_n(\alpha, x_n) = \frac{\sqrt{P^2 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_n - \alpha)^2} + \sqrt{(P^2 + \varepsilon^2(\lambda^2 - 1) + (x_n - \alpha)^2) - 4\varepsilon^2(\lambda^2 - 1) \cdot (x_n - \alpha)^2}}{\sqrt{2\varepsilon} \cdot \sqrt{\lambda^2 - 1}};$$

$$\bar{\eta}_n(\alpha, x_n) = \frac{x_n - \alpha}{\xi_n(x_n, \alpha) \cdot \varepsilon \sqrt{\lambda^2 - 1}};$$

$P = \frac{R_0}{R}$  – отношение средних радиусов компенсационной и измерительной обмоток.

Сформированный выходной сигнал ТДП позволяет подавить влияние воздействия вариаций электрофизических свойств материала подвижного элемента на выходную характеристику датчика. Задавая определенные значения параметрам  $\gamma_i$ , можно изменять количество измерительных обмоток, их расположение и схему включения, оптимизируя таким образом вид выходной характеристики ТДП.

Разработанная математическая модель использована при разработке ТДП, предназначенного для измерения перемещений солнечных батарей спутникового аппарата в условиях открытого космоса, конструктивная схема ТДП представлена на рис. 2, а его технические характеристики в табл. 1.

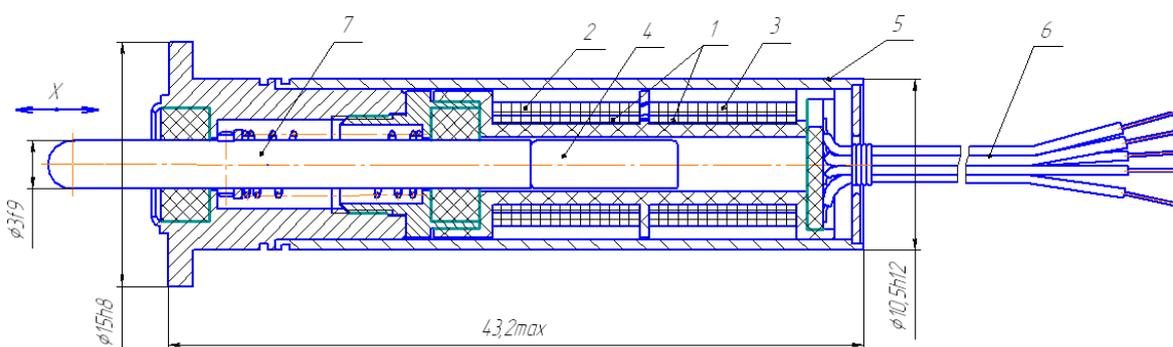


Рис. 2. Конструктивная схема чувствительного элемента ТДП: 1 – обмотка возбуждения; 2, 3 – обмотки считывания; 4 – ферромагнитная вставка; 5 – корпус; 6 – кабельная перемычка; 7 – шток

Таблица 1

Основные технические характеристики ТДП

Параметр	Характеристика
Диапазон измерения перемещений	от 0 до 5 мм
Основная приведенная погрешность	не более 1,5 %
Воздействия синусоидальной вибрации	частотный диапазон от 5 до 100 Гц амплитуда ускорения до 20g
Диапазон рабочих температур	от -50 до +50 °С
Потребляемый ток	не более 125 мА
Выходной сигнал	от 0 до 6,3 В
Напряжение питания	27 ± 2 В

#### Список литературы

1. Колюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М. : Машиностроение, 1987. 256 с.
2. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.
3. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.
4. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005 № 9. С. 44–46.
5. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
6. Трофимов А. Н., Блинов А. В., Трофимов А. А. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 24–29.
7. Морс М., Фижбах К. Методы теоретической физики. М. : Иностран. лит., 1961. 762 с.

**References**

1. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevskiy M.L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin = Electromagnetic sensors of mechanical quantities*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:256. (In Russ.)
2. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monografiya = Mutually inductive displacement sensors : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (In Russ.)
3. Trofimov A.N., Trofimov A.A. Expansion of the temperature range of raster transformer displacement sensors. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2009;(6):24–27. (In Russ.)
4. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
6. Trofimov A.N., Blinov A.V., Trofimov A.A. Unified series of high-temperature raster electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(7):24–29. (In Russ.)
7. Mors M., Fizhbakh K. *Metody teoreticheskoy fiziki = Methods of theoretical physics*. Moscow: Inostr. lit., 1961:762. (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)

**Екатерина Александровна Фокина**

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

**Ekaterina A. Fokina**

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

**Дмитрий Максимович Марков**

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

**Dmitry M. Markov**

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

**Иван Евгеньевич Смирнов**

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

**Ivan E. Smirnov**

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

**Владислав Николаевич Пономарев**

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

**Vladislav N. Ponomarev**

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 24.10.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 27.12.2022**

## ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ И АЛГОРИТМА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

А. Ю. Наумова<sup>1</sup>, А. Ю. Дмитриевцев<sup>2</sup>, Ю. Т. Зырянов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия  
<sup>1</sup>nastja.naumova@mail.ru, <sup>2</sup>dmitrievcev978@mail.ru, <sup>3</sup>zut-tmb@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Проводная связь востребована в различных отраслях народного хозяйства, а также в силах гражданской обороны и ВС РФ. В настоящее время на всей территории РФ, как правило, в эксплуатации находятся цифровые системы связи, относящиеся к классу телекоммуникационных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) зарубежных производителей, ремонт и диагностику которого осуществляют филиалы этих организаций. В связи со сложной политической обстановкой затруднен квалифицированный ремонт и обслуживание этого оборудования, что влечет за собой негативные последствия как для абонентов, пользующихся услугами связи, так и для операторов, эти услуги предоставляющих. Одним из перспективных направлений решения задачи является непрерывный контроль изменения определяющих техническое состояние параметров телекоммуникационного оборудования в процессе эксплуатации с учетом воздействия дестабилизирующих факторов. К сожалению, не в полной мере применяются новые информационные технологии для управления техническим состоянием телекоммуникационного оборудования, которые позволят достигать требуемого уровня готовности к эффективному применению при снижении уровня материальных и трудовых затрат. В связи с этим требуется совершенствовать существующие и разработать новые подходы к решению этой задачи. Цель статьи – формирование базы данных для технического диагностирования телекоммуникационного оборудования ИИУС. *Материалы и методы.* В качестве объекта диагностирования использована плата СМФ, входящая в состав ИИУС Iskratel Si3000v6. Применен комбинационный метод технической диагностики. *Результаты.* Модифицирован комбинационный метод, создана база данных эталонных значений платы СМФ. Рассмотрен комплекс возможных аппаратных ошибок и предложены способы их устранения. *Выводы.* Предложенный подход позволит в дальнейшем осуществлять диагностику и ремонт платы СМФ без передачи сторонним организациям, что сокращает финансовые расходы. Созданная база данных в дальнейшем открывает возможность прогнозирования технического состояния телекоммуникационного оборудования с применением методов машинного обучения.

**Ключевые слова:** техническое диагностирование телекоммуникационного оборудования, формирование базы данных, плата СМФ Iskratel Si3000v6

**Для цитирования:** Наумова А. Ю., Дмитриевцев А. Ю., Зырянов Ю. Т. Формирование базы данных и алгоритма для технического диагностирования телекоммуникационного оборудования информационно-измерительной и управляющей системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 38–44. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-5

## DATABASE AND ALGORITHM FORMATION FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM

A.Yu. Naumova<sup>1</sup>, A.Yu. Dmitriyevtsev<sup>2</sup>, Yu.T. Zyryanov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
<sup>1</sup>nastja.naumova@mail.ru, <sup>2</sup>dmitrievcev978@mail.ru, <sup>3</sup>zut-tmb@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Wired communications are in demand in various sectors of the national economy, as well as in the civil defense forces and the RF Armed Forces. Currently, throughout the Russian Federation, as a rule, digital communication systems belonging to the class of telecommunication information-measuring and control systems (IMMS) of foreign manufacturers are in operation, repair and diagnostics, which are carried out by branches of these organizations. Due to the difficult political situation, qualified repair and maintenance of this equipment is difficult,

which entails negative consequences both for subscribers using communication services and for operators providing these services. One of the promising directions for solving the problem is continuous monitoring of changes in the technical condition parameters of telecommunication equipment during operation, taking into account the impact of destabilizing factors. Unfortunately, new information technologies are not fully applied to control the technical condition of telecommunication equipment, which will allow achieving the required level of readiness for effective use while reducing the level of material and labor costs. In connection, it is required to improve existing and develop new approaches to solving this problem. The purpose of the article is to form a database for technical diagnostics of telecommunications equipment IMSS. Materials and methods. The *CMF* board, which is part of the *Iskratel Si3000v6 ICS*, was used as an object for diagnosing. A combination method of technical diagnostics was applied. Results. The combinational method has been modified; a database of reference values of the *CMF* board has been created. A set of possible hardware errors is considered and ways to eliminate them are proposed. Conclusions. The proposed approach will allow further diagnostics and repair of the *CMF* board without transferring it to third parties, which reduces financial costs. The created database further opens up the possibility of predicting the technical condition of telecommunications equipment using machine learning methods.

**Keywords:** technical diagnostics of telecommunication equipment, database formation, *CMF Iskratel SI3000v6* board

**For citation:** Naumova A.Yu., Dmitriyev A.Yu., Zyryanov Yu.T. Database and algorithm formation for technical diagnostics of telecommunication equipment of information-measuring and control system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):38–44. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-5

### Введение

Техническая диагностика уже давно стала одним из приоритетных инструментов радиоинженеров для технического обслуживания телекоммуникационного оборудования. В настоящее время существует обширная библиография диагностических методов, использующих анализ изменения контролируемых параметров в процессе эксплуатации объекта исследования [1, 2]. При этом решаются задачи диагностики (определение текущего технического состояния объекта) и прогнозирования (определение будущего технического состояния). Это необходимо для повышения вероятности безотказной работы, определения возможного продления срока службы, частоты проведения профилактических мероприятий при техническом обслуживании и др. Бурное развитие получило телекоммуникационное оборудование цифровых систем связи (ЦСС). Так, например ЦСС *Iskratel Si3000v6* – наиболее востребованная для построения новых и модернизации существующих *NGN* систем связи в России. Необходимо отметить, что *Si3000v6* является сложной информационно-измерительной и управляющей системой (ИИУС) [3]. Для выявления и устранения неисправностей телекоммуникационного оборудования ИИУС применяется большое количество датчиков, используется дорогостоящее программное обеспечение и т.д. При этом информация об изменениях контролируемых параметров выводится в реальном масштабе времени в виде цифропечати на мониторы, однако никуда не сохраняется и редко используется для анализа технического состояния в процессе эксплуатации. В данной статье рассмотрен один из подходов к техническому диагностированию телекоммуникационного оборудования *Iskratel Si3000v6*, который позволит оперативно выявить и устранить неисправности.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана процессорная плата *CMF* семейства оборудования *Si3000v6* (рис. 1).



Рис. 1. Объект исследования – процессорная плата *CMF*

Исследуемое оборудование было введено в эксплуатацию в 2008 г. За это время сформирована достаточная база данных по статистике отказов и неисправностей, что позволяет оперативно определить основные причины выхода из строя плат *CMF*. Статистика по основным причинам выхода из строя плат *CMF*, а также количество подлежащих ремонту плат представлены в табл. 1.

Таблица 1

Причина неисправности	Количество неисправностей, %
Деградация жесткого диска	48,5
Выход из строя системы питания на плате	27,4
Аппаратные проблемы	19,1
Неремонтопригодные повреждения	3,8
Необратимая деградация узлов обработки данных	1,2

Большая часть неисправностей приходится на деградацию жесткого диска, ресурс которого ограничен. Оповещение о его неисправности выводится в системе мониторинга платы. Для определения этой неисправности достаточно установить на его место заведомо исправный диск. Неисправность систем питания составляет почти треть от общего количества неисправностей. Данный тип неисправностей характеризуется полной или частичной работоспособностью платы. Для выявления этих неисправностей необходимо разработать комплекс мер по измерению параметров и выявлению поврежденных узлов. Аппаратные неисправности, несмотря на их большое количество, являются (в большинстве случаев) легко устранимыми за счет того, что для этого не требуется физического вмешательства в плату. Неремонтопригодные повреждения и необратимая деградация узлов обработки данных в наименьшем количестве являются причинами выхода из строя платы *CMF*. В обоих случаях ремонт плат физически невозможен или нецелесообразен ввиду ряда обстоятельств (отсутствие процессоров и большинства резервных элементов для ремонта встроенной платы). На основании анализа статистики можно сделать вывод, что актуальным вопросом является формирование базы данных и алгоритма диагностирования системы питания платы *CMF*.

### Результаты и обсуждение

Предлагаемый алгоритм включает несколько основных этапов. Начальный этап подразумевает визуальный осмотр платы, по результатам которого делается заключение по внешним признакам (сильное механическое повреждение, сквозной прогар и т.д.) о возможности и целесообразности дальнейшей более углубленной технической диагностики и последующего за ней ремонтом [4–6]. После осуществления всех мер по восстановлению внешних неисправностей можно приступить ко второму этапу диагностирования. Второй этап включает в себя измерение в процессе эксплуатации основных определяющих параметров на исправных платах в различных местах их установки, таких как значения сопротивления и напряжения в контрольных точках. Данный этап позволяет определить наличие коротких замыканий (КЗ) или возможных обрывов. На данном этапе воспользуемся комбинационным методом диагностики [6], но усовершенствуем его для получения более достоверных результатов контроля и их последующего применения при устранении отказов. Для этой цели все измерения будем заносить не в комбинационную таблицу в двоичном виде, а в файл с расширением *.xls* в программе Excel, в которой заблаговременно сформируем базу данных, полученную в результате измерения основных контролируемых параметров с эталонной (рабочей) платы. Кроме того, определим алгоритм, который будет выводить на основе анализа измеренных значений параметров возможный перечень неисправностей, с последующими рекомендациями по их устранению (рис. 2) [7, 8].

Эти меры позволят более оперативно определять работоспособность элементов платы. Порядок измерения значений параметров может быть любым. После первого цикла измерений необходимо произвести устранение выявленных неисправностей и провести повторное измерение. Данный цикл повторяется до тех пор, пока все полученные значения не будут в преде-

лах нормы. По мере необходимости данная таблица может дополняться эталонными значениями других элементов платы. Это позволит значительно повысить оперативность ремонта в дальнейшей эксплуатации и выявлять причину неисправностей. Третьим этапом является пробное включение объекта. При появлении индикации на сигнализационных диодах платы можно переходить к следующему этапу. При отсутствии индикации и реакции на включение необходимо проверить наличие питания на входе устройства. При его наличии необходимо обесточить плату и вернуться ко второму этапу. Четвертый этап технического диагностирования включает в себя измерения значений напряжений в контрольных точках платы. На данном этапе воспользуемся усовершенствованным комбинационным методом диагностики, который использовался в третьем этапе (рис. 3, 4).

	Эталонное значение, Ом	Значение на диагностируемом объекте, Ом	Комплекс мер по решению проблемы
2	Входное сопротивление 1500 - 2200	300 Ом	Проверка защитного диода в цепи питания преобразователя напряжения, Проверка фильтрующих емкостей в цепи питания преобразователя, Проверка силового ключа в цепи питания преобразователя
3	Сопротивление на предохранителе №1 0,1-0,3	0,115 Ом	Никаких действий не требуется
4	Сопротивление на предохранителе №2 0,1-0,3	>100000	Необходима замена диагностируемого предохранителя
5	Сопротивление на предохранителе №3 0,1-0,3	>100000	Необходима замена диагностируемого предохранителя

Рис. 2. Эталонные значения сопротивления в контрольных точках

	Эталонное значение, Вольт	Значение на диагностируемом объекте, Вольт	Комплекс мер по решению проблемы
2	Напряжение на предохранителе №1 42-56	49,3	Никаких действий не требуется
3	Напряжение на предохранителе №2 42-56	48,3	Никаких действий не требуется
4	Напряжение на предохранителе №3 42-56	0	Проверка наличия входного напряжения, необходима замена диагностируемого предохранителя
5	Напряжение на пятивольтовом преобразователе в контрольной точке №1 42-60	52	Никаких действий не требуется
6	Напряжение на пятивольтовом преобразователе в контрольной точке №2 42-56	51,2	Никаких действий не требуется
7	Напряжение на пятивольтовом преобразователе в контрольной точке №3 4,5-5,4	0	

Рис. 3. Эталонные значения напряжения в контрольных точках

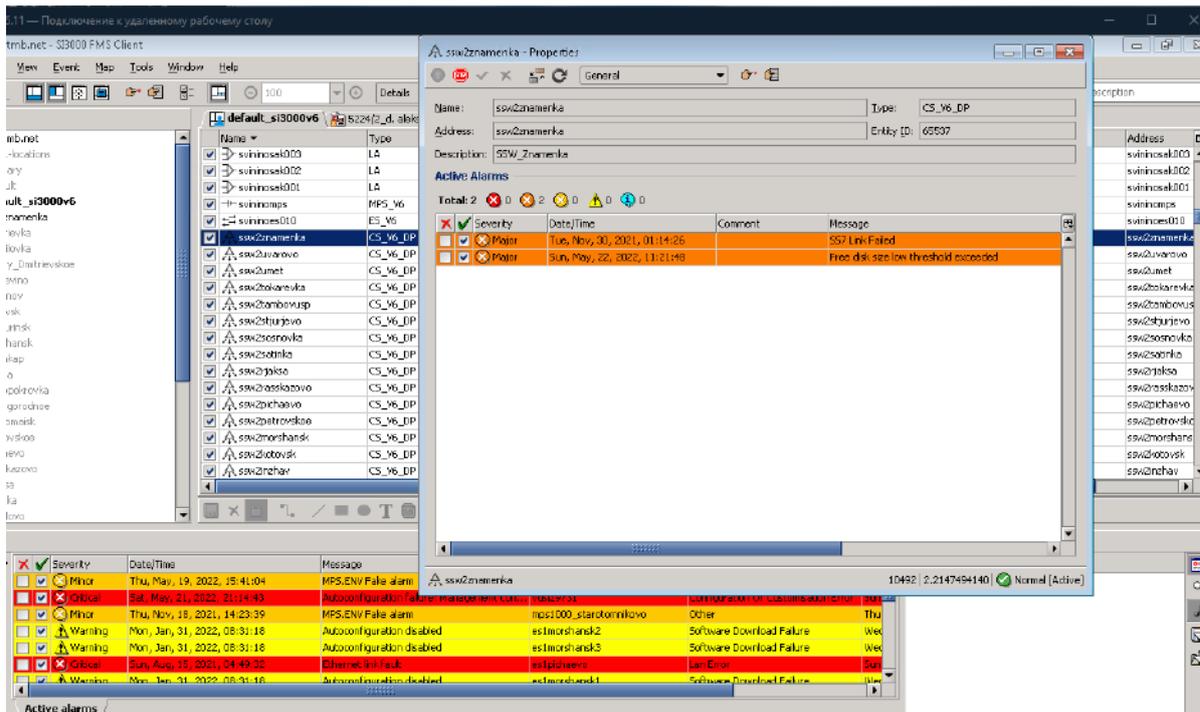


Рис. 4. Пример наличия аппаратных ошибок

В результате комплекса данных мер мы должны получить работоспособное устройство, которое в дальнейшем необходимо отконфигурировать и провести поиск возможных аппаратных ошибок. На финальном этапе устранения возможных неисправностей необходимо удостовериться в отсутствии аппаратных ошибок, которые могут возникать при работе. Наличие аппаратных ошибок может также косвенно указывать на наличие различных физических неисправностей или повреждений, что и приводит к их возникновению. К такому выводу можно прийти, если были предприняты все аппаратные меры, указанные в следующем разделе по их устранению. Все ошибки, появляющиеся в процессе тестирования и работы платы, могут повлиять на функционирование *Iskratel Si3000v6* в целом и привести к выходу из строя периферии, подключенной к данному устройству. После устранения всех аппаратных и физических неисправностей необходимо провести тестирование. Далее плата будет установлена на испытательный стенд и будет проверяться в течение 48 ч при соблюдении эксплуатационных параметров, что позволит убедиться в его полной работоспособности. После этого плату можно установить на действующее оборудование, предварительно загрузив в него актуальное программное обеспечение и отметив в сопроводительном листе, какие работы были произведены. Это позволит в дальнейшем оценивать его рабочий ресурс и упростит диагностику при последующих возможных неисправностях.

### Заключение

В результате исследования была проанализирована структура платы *CMF*, входящей в ИИУС *Iskratel Si3000v6*, проведен анализ статистики неисправностей за исследуемый период работы данной системы. Осуществлен выбор метода поиска неисправностей, а также сформирован алгоритм диагностирования данной платы, рассмотрены основные возможные неисправности, способы их устранения. Модифицирован комбинационный метод диагностики, создана база данных эталонных (измеренных в процессе эксплуатации) значений определяющих параметров объекта диагностирования. Рассмотрен комплекс возможных аппаратных ошибок и предложены способы их устранения. Предложенный подход позволит в дальнейшем осуществлять диагностику и ремонт платы *CMF* без передачи сторонним организациям, что сокращает финансовые расходы, а также экономит время и средства на отправку объекта в организацию, занимающуюся ремонтом данного изделия. Созданная база данных в дальнейшем

открывает возможность прогнозирования технического состояния телекоммуникационного оборудования с применением методов машинного обучения [9, 10].

#### Список литературы

1. Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С., Халчев В. Ф. Основы технической диагностики. М. : Энергия, 1976. 464 с.
2. Глазунов Л. П., Смирнов А. Н. Проектирование технических систем диагностирования. Л. : Энергоатомиздат, 1982. 168 с.
3. Дмитриевцев А. Ю., Наумова А. Ю., Зырянов Ю. Т. Обоснование принадлежности «Iskratel si3000» к классу телекоммуникационных информационно-измерительных и управляющих систем // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов, 2021. С. 32–34.
4. Беляев Ю. К., Богатырев В. А., Болотин В. В. [и др.]. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 608 с.
5. Абрамов О. В., Розенбаум А. Н. Прогнозирование состояния технических систем. М. : Наука, 1990. 126 с.
6. Животкевич И. Н., Смирнов А. П. Надежность технических изделий. М. : Институт испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. 472 с.
7. Селиванова З. М., Хоан Т. А. Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 13–19.
8. Волобуев С. В., Евдокимов А. П., Меликов А. В. [и др.]. Методы и средства повышения надежности модулей памяти компьютеров. Волгоград : Волгоградский ГАУ «Нива», 2018. 284 с.
9. Куминов А. С. Распределенные системы диагностирования и диагностические модели на нейронных сетях : препринт. Хабаровск : Вычислительный центр ДВО РАН, 2003. 28 с.
10. Рязанов И. Г., Зырянов Ю. Т., Наумова А. Ю. Техническое диагностирование информационно-измерительной и управляющей системы с применением нейросетевых технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 5. С. 37–46.

#### References

1. Karibskiy V.V., Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S., Khalchev V.F. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki = Fundamentals of technical diagnostics*. Moscow: Energiya, 1976:464. (In Russ.)
2. Glazunov L.P., Smirnov A.N. *Proektirovanie tekhnicheskikh sistem diagnostirovaniya = Design of technical diagnostic systems*. Leningrad: Energoatomizdat, 1982:168. (In Russ.)
3. Dmitriyevtsev A.Yu., Naumova A.Yu., Zyryanov Yu.T. Justification of belonging of "Iskratel si3000" to the class of telecommunication information-measuring and control systems. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchennykh i spetsialistov = Energy saving and efficiency in technical systems : Materials of the VIII International Scientific and Technical conf. of students, young scientists and specialists*. Tambov, 2021:32–34. (In Russ.)
4. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik = Reliability of technical systems : handbook*. Moscow: Radio i svyaz', 1985:608. (In Russ.)
5. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. *Prognozirovanie sostoyaniya tekhnicheskikh system = Forecasting the state of technical systems*. Moscow: Nauka, 1990:126. (In Russ.)
6. Zhivotkevich I.N., Smirnov A.P. *Nadezhnost' tekhnicheskikh izdeliy = Reliability of technical products*. Moscow: Institut ispytaniy i sertifikatsii vooruzheniy i voennoy tekhniki, 2004:472. (In Russ.)
7. Selivanova Z.M., Khoan T.A. Evaluation of the reliability of the information-measuring system of thermophysical properties of materials under the influence of destabilizing factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):13–19. (In Russ.)
8. Volobuev S.V., Evdokimov A.P., Melikov A.V. et al. *Metody i sredstva povysheniya nadezhnosti moduley pamyati komp'yuteroov = Methods and means of improving the reliability of computer memory modules*. Volgograd: Volgogradskiy GAU «Niva», 2018:284. (In Russ.)
9. Kuminov A.S. *Raspredelelennye sistemy diagnostirovaniya i diagnosticheskie modeli na neyronnykh setyakh: preprint = Distributed diagnostic systems and diagnostic models on neural networks : preprint*. Khabarovsk: Vychislitel'nyy tsentr DVO RAN, 2003:28. (In Russ.)
10. Ryazanov I.G., Zyryanov Yu.T., Naumova A.Yu. Technical diagnostics of information-measuring and control systems using neural network technologies. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2019;(5):37–46. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Анастасия Юрьевна Наумова**

аспирант,  
Тамбовский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: nastja.naumova@mail.ru

**Anastasia Yu. Naumova**

Postgraduate student,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Андрей Юрьевич Дмитриевцев**

аспирант,  
Тамбовский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: dmitrievcev978@gmail.com

**Andrey Yu. Dmitrievtsev**

Postgraduate student,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Юрий Трифонович Зырянов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры конструирования  
радиоэлектронных и микропроцессорных систем,  
Тамбовский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
E-mail: zut-tmb@mail.ru

**Yury T. Zyryanov**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of design  
of radioelectronic and microprocessor systems,  
Tambov State Technical University  
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 29.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 29.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 24.12.2022**

УДК.621.3.084  
doi:10.21685/2307-5538-2023-1-6

## ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ КОММУТАЦИОННО-ТАКТОВОЙ ФАЗОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

А. Р. Григорьян<sup>1</sup>, Н. М. Богатов<sup>2</sup>, Р. Л. Григорьян<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

<sup>3</sup> Научно-производственная фирма «Мезон», Краснодар, Россия

<sup>1</sup>leonmezon@mail.ru, <sup>2</sup>bogatov@phys.kubsu.ru, <sup>3</sup>mezon\_kub@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены вопросы применения микроконтроллеров в измерительной технике как непосредственно в измерительных процедурах, так и в последующей математической обработке выходных данных. *Материалы и методы.* Предложены методы преобразования сигналов с программно-изменяемой структурой измерительного тракта с применением коммутируемых дополнительных масштабных преобразователей. Проанализированы возникающие при коммутационном преобразовании сигналов погрешности и предложены технические решения по устранению аддитивной коммутационной и мультипликативной амплитудно-фазовой погрешностей. *Результаты и выводы.* Предложенные методы преобразования сигналов с программно-изменяемой структурой измерительного тракта имеют универсальный характер, и могут быть использованы как в однополюсных, так в многополюсных измерительных структурах.

**Ключевые слова:** анализатор, фазовые методы, такт, фазовращатель, коммутатор

**Для цитирования:** Григорьян А. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Применение микроконтроллеров в программно-конфигурируемом измерительном тракте коммутационно-тактовой фазоизмерительной аппаратуре // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 45–55. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-6

## APPLICATION OF MICROCONTROLLERS IN A SOFTWARE-CONFIGURABLE MEASURING SWITCHING-CLOCK PATH PHASE MEASURING EQUIPMENT

L.R. Grigoryan<sup>1</sup>, N.M. Bogatov<sup>2</sup>, R.L. Grigoryan<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Kuban State University, Krasnodar, Russia

<sup>3</sup> Scientific and production company "Mezon", Krasnodar, Russia

<sup>1</sup>leonmezon@mail.ru, <sup>2</sup>bogatov@phys.kubsu.ru, <sup>3</sup>mezon\_kub@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The paper considers the issues of using microcontrollers in measuring technology directly in measuring procedures and the subsequent mathematical processing of output data. *Materials and methods.* Methods are proposed for converting signals with a programmatically changeable structure of the measuring path using switched different scale converters. Errors arising during switching conversion signals are analyzed, and technical solutions are proposed to eliminate additive switching and multiplicative amplitude-phase errors. The proposed methods for converting signals with a program-changeable structure of the measuring path are universal. *Results and conclusions.* They can be used both in single-pole and multi-pole measuring structures.

**Keywords:** analyzer, phase methods, cycle, phase shifter, commutator

**For citation:** Grigoryan L.R., Bogatov N.M., Grigoryan R.L. Application of microcontrollers in a software-configurable measuring switching-clock path phase measuring equipment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):45–55. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-6

**Введение.** Доминирующей тенденцией развития современной науки и техники является внедрение средств вычислительной техники практически во все области жизнедеятельности человека.

Развитие и содержание этого процесса «цифровизации» зависят от многих факторов, но основные, на наш взгляд, определяются технологическим уровнем развития микроэлектрони-

ки, являющейся материальной основой данного процесса, и совершенствованием средств измерения, определяющих границы точности технологических процессов.

Наиболее ощутимо совершенство методов и средств измерений происходит в фазоизмерительной технике. Это обусловлено широким внедрением фазовых методов в различных физико-технических приложениях, где использование уникальных свойств фазовых измерений наиболее предпочтительно [1, 2].

Отличительной особенностью фазоизмерительной техники является двухканальная структура ее измерительного тракта, нестабильность и неидентичность фазовых параметров измерительных каналов которого предопределяет в целом предельную точность фазовых измерений [3]. Радикальным решением этой проблемы является разбиение измерительной процедуры на два такта [4]. В первом такте происходит измерение разности фаз исследуемых измерительного и опорного сигналов, а во втором такте, при подаче на оба канала только опорного сигнала, измерение их фазовой неидентичности и нестабильности. Безусловно, практическая реализация такого подхода возможна только при наличии цифрового процессора, осуществляющего как управленческие, так и вычислительные функции. Рассмотрение этого вопроса целесообразно начать с анализа обобщенной структурной схемы коммутационно-тактового фазоизмерителя, представленной на рис. 1.

**Коммутационно-тактовый фазоизмеритель** включает двухканальный коммутатор, состоящий из переключателя  $\Pi_{\Omega}$  и генератора коммутационных импульсов  $\Gamma_{\Omega}$ , два усилителя-ограничителя  $УО_1$ ,  $УО_2$  и ключевой фазовый детектор, выходные импульсы которого могут быть преобразованы в пропорциональное напряжение или в эквивалентный цифровой код.

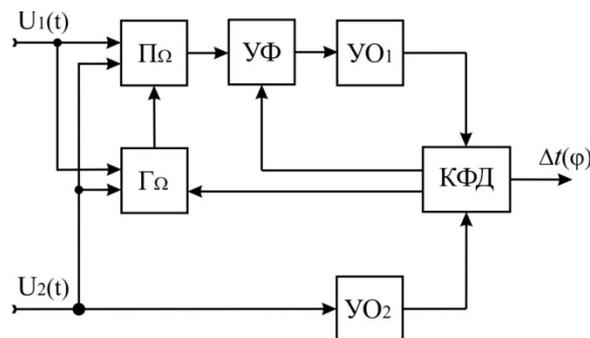


Рис. 1. Обобщенная структурная схема коммутационно-тактового измерителя фазовых сдвигов

Двухтактный алгоритм сравнения фазовых параметров сигналов  $U_1(t) = U_{m_1} \sin(\omega_0 t + \varphi_1)$  и  $U_2(t) = U_{m_2} \sin(\omega_0 t + \varphi_2)$  заключается в следующем.

Исследуемые сигналы через переключатель  $\Pi_{\Omega}$  поочередно поступают на усилитель-ограничитель  $УО_1$ . Одновременно на усилитель-ограничитель  $УО_2$  опорного канала подается сигнал  $U_2(t)$ . Таким образом, на выходе ключевого фазового детектора (КФД) формируются импульсы первого  $\Delta t_1$  и второго  $\Delta t_2$  такта коммутации:

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega} \left[ (\varphi'_f - \varphi''_f) + (\varphi'_{U_1} - \varphi''_{U_2}) \right], \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega} \left[ \varphi + (\varphi'_f - \varphi''_f) + (\varphi'_{U_1} - \varphi''_{U_2}) \right], \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  – измеряемая разность фаз.

Соответственно, разностный сигнал определяется из выражения

$$\Delta t_{\varphi} = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \frac{\varphi}{\omega} + \frac{1}{\omega} (\varphi'_{U_1} - \varphi''_{U_2}) = \frac{1}{\omega} (\varphi + \Delta\varphi_U), \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi_U = (\varphi'_{U_1} - \varphi''_{U_2})$  – амплитудно-фазовая погрешность измерительного тракта.

Из формулы (3) следует, что разностный сигнал не зависит от фазовой и амплитудной неидентичности каналов  $\Delta\phi_f$ ,  $\Delta\phi_U$ , и это обстоятельство свидетельствует о потенциальных возможностях коммутационно-тактового метода.

Однако реализация этих возможностей предполагает решение ряда проблем, присущих также этому методу. Поскольку эти вопросы коррелируются со схемотехникой конкретных узлов устройства, дальнейший анализ проведем в данном контексте по каждому его элементу.

**Двухканальный коммутатор.** Коммутационный способ преобразования сигналов прошел несколько этапов в своем развитии: от первоначального асинхронного до одно- и двухфазного синхронного способа коммутации сигналов. Недостатком асинхронного способа коммутации является значительные коммутационные погрешности. Основными причинами их возникновения являются:

- наличие в спектре выходного сигнала переключателя  $\Pi_\Omega$  комбинационных частот, кратных частоте коммутации;
- смещение исследуемых сигналов после переключателя относительно нулевой линии;
- наличие интерференционных помех, обусловленных эффектом наложения затухающих колебаний от предыдущего сигнала на неустановившиеся колебания последующего сигнала (эффект энергоемких элементов).

Впервые эти погрешности рассмотрены в работах [5, 6], из аналитического материала которых следует, что коммутационные погрешности зависят не только от соотношений  $\eta = \frac{\omega}{\Omega}$

и  $W = \frac{U_{m_1}}{U_{m_2}}$ , но и от величины фазового сдвига между сравниваемыми сигналами и импульсами коммутации.

Полное исключение коммутационных погрешностей обеспечивается, когда каждый полупериод коммутации начинается и заканчивается при нулевом фазовом сдвиге исследуемых сигналов. Для реализации этих условий разработаны двухканальные коммутаторы, реализующие соответственно однофазный и двухфазный способы синхронной коммутации сигналов [7, 8].

Общим недостатком предложенных решений является сложность оперативного изменения частоты переключения исследуемых сигналов, определяемой длительностью выходных импульсов времязадающих одновибраторов.

Для исключения данного недостатка разработана схема двухканального коммутатора сигналов (рис. 2), в котором управляющие и времязадающие функции возложены на микроконтроллер [9]. Для иллюстрации предложенного схемотехнического решения на рис. 3 приведены временные диаграммы, поясняющие принцип действия коммутатора.

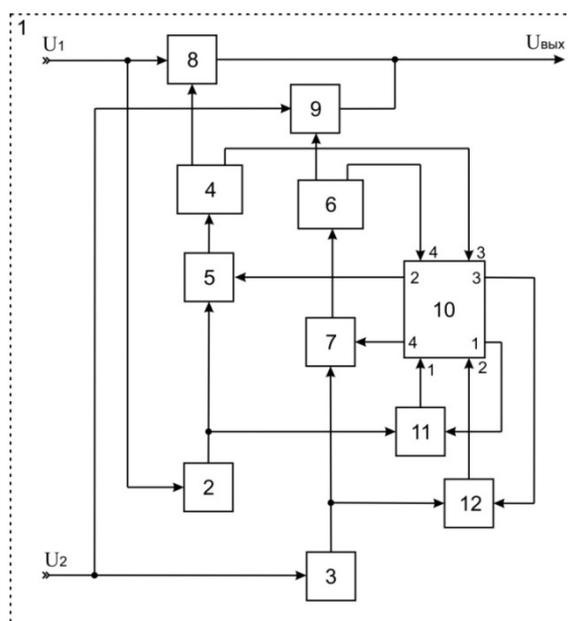


Рис. 2. Структурная схема двухканального коммутатора

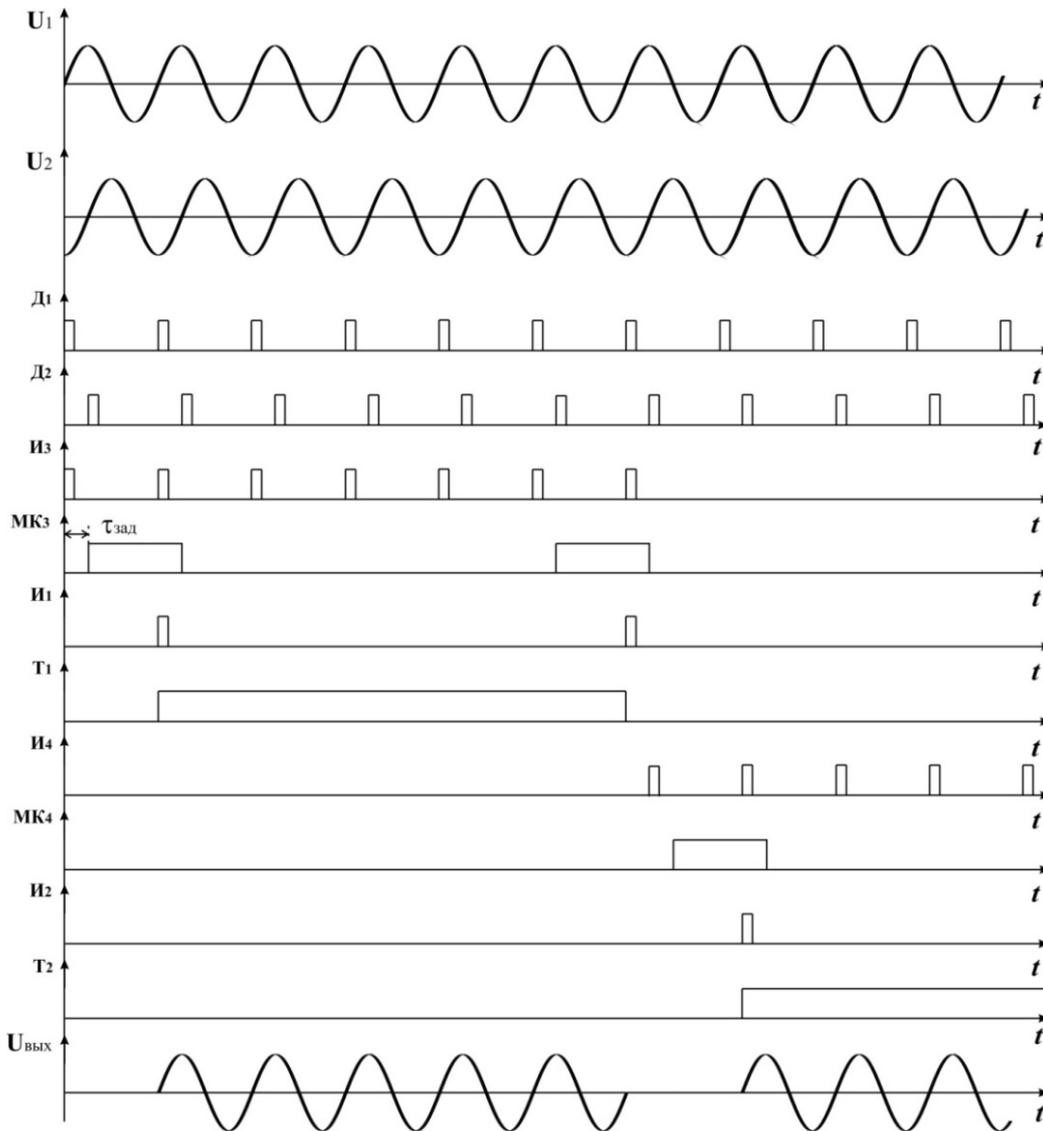


Рис. 3. Временные диаграммы двухканального коммутатора

Двухканальный коммутатор гармонических сигналов *1* состоит из двух дискриминаторов *2* и *3*, триггера *4* и элемента «И» *5* первого канала, триггера *6* и элемента «И» *7* второго канала, двух ключей *8* и *9*, а также микроконтроллера *10* и двух дополнительных элементов «И» *11* и *12*.

Детальное рассмотрение работы устройства целесообразно начать с исходного положения, когда оба триггера *4* и *6* установлены в нулевое состояние и ключи *8* и *9* находятся в выключенном состоянии.

В первом такте по сигналу с первого управляющего выхода микроконтроллера *10* на элемент «И» *11* поступает разрешающий сигнал, и импульсы с дискриминатора *1* начинают поступать на первый информационный вход микроконтроллера *10*. С некоторой задержкой  $\tau_{\text{зад}}$  со второго управляющего выхода микроконтроллера *10* поступает разрешающий сигнал на элемент «И» *5*, что позволяет очередному импульсу с дискриминатора *2* опрокинуть триггер *4* в единичное положение. Ключ *8* переключается в замкнутое положение и сигнал  $U_1(t)$  поступает на выход устройства *1*. После подсчета  $K$  импульсов дискриминатора *2* (задается программным способом и определяется частотой входных сигналов) с третьего управляющего выхода микроконтроллера *10* вновь появляется разрешающий сигнал, что позволяет импульсу с дискриминатора *2* вернуть триггер *4* в первоначальное нулевое положение. Ключ *8* выключается и прохождение сигнала  $U_1(t)$  на выход устройства *1* прекращается.

Во втором такте рассмотренная последовательность действий повторяется при задействовании элементов второго канала, логического элемента «И» 12, а также второго управляющего выхода и второго информационного входа микроконтроллера 10.

Отметим, что информационные входы 3 и 4 микроконтроллера 10 предназначены для его синхронизации при переключении триггеров 4 и 6.

Из рассмотренного принципа действия коммутатора следует:

- переключение исследуемых сигналов начинается и заканчивается в моменты их перехода через ноль, т.е. при нулевом фазовом сдвиге;
- одновременно время коммутации (период коммутации) не строго детерминировано, а программно управляемо в зависимости от частоты сигнала. Так, в герцевом диапазоне период составляет единицы секунд, а с повышением частоты уменьшается до сотен миллисекунд.

**Ключевой фазовый детектор.** В качестве ключевых элементов в ФД используются триггеры или схемы совпадения. В отличие от триггерного ФД на схемах совпадения обеспечивают непрерывность характеристики и повышенную помехозащищенность. Общим недостатком простейших схем КФД является линейность характеристики преобразователя только в пределах полупериода  $\varphi_{\max} = P_{\max} \omega < \pi$ , где  $P_{\max} = \frac{T_{\omega}}{2}$ . Для устранения данного недостатка разработаны схемы ключевых ФД, в которых используется деление частоты исследуемых сигналов на два [10] или на три [11].

Схемотехника данных КФД реализована с использованием ключевых формирователей импульсов и триггерных делителей частоты, неидентичность временных характеристик которых в двухканальной схеме преобразователя приводит к существенным фазовым флюктуациям его выходного сигнала. Для устранения данного недостатка предложен новый алгоритм понижения частоты исследуемых сигналов.

Структурная схема разработанного КФД представлена на рис. 4, а на рис. 5 временные диаграммы, иллюстрирующие принцип его действия [12]. Принципиальным отличием данного КФД является использование совершенного нового цифрового синхронизатора, базовым элементом которого является микроконтроллер 12 с соответствующим программным обеспечением. Запуск программы и в целом синхронизация микроконтроллера 12 осуществляются сигналами с прямых выходов усилителей-ограничителей 4 и 5. С поступлением первых импульсов вычисляется период  $T_{\omega}$  исследуемых сигналов. Далее фиксируется начальный импульс с усилителей-ограничителей 4, 5 и начинается процесс генерации управляющих сигналов  $T_{\gamma}$ . Эти сигналы с выходов 1 и 2 микроконтроллера 12 поступают на разрешающие входы схем «И» 13 и 15 измерительного канала, а с выходов 3 и 4 – на разрешающие входы схем «И» 14 и 16 опорного канала.

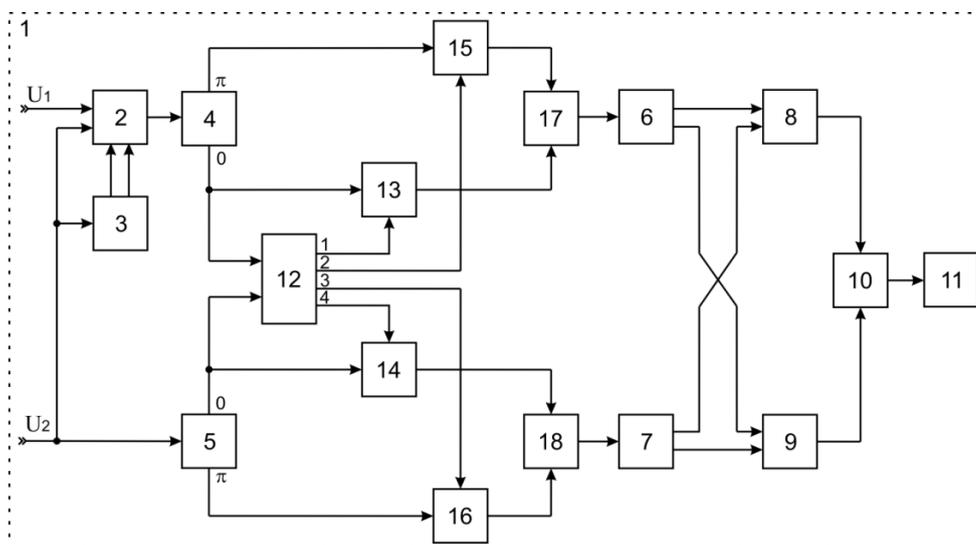


Рис. 4. Структурная схема коммутационного преобразователя фазовых сдвигов

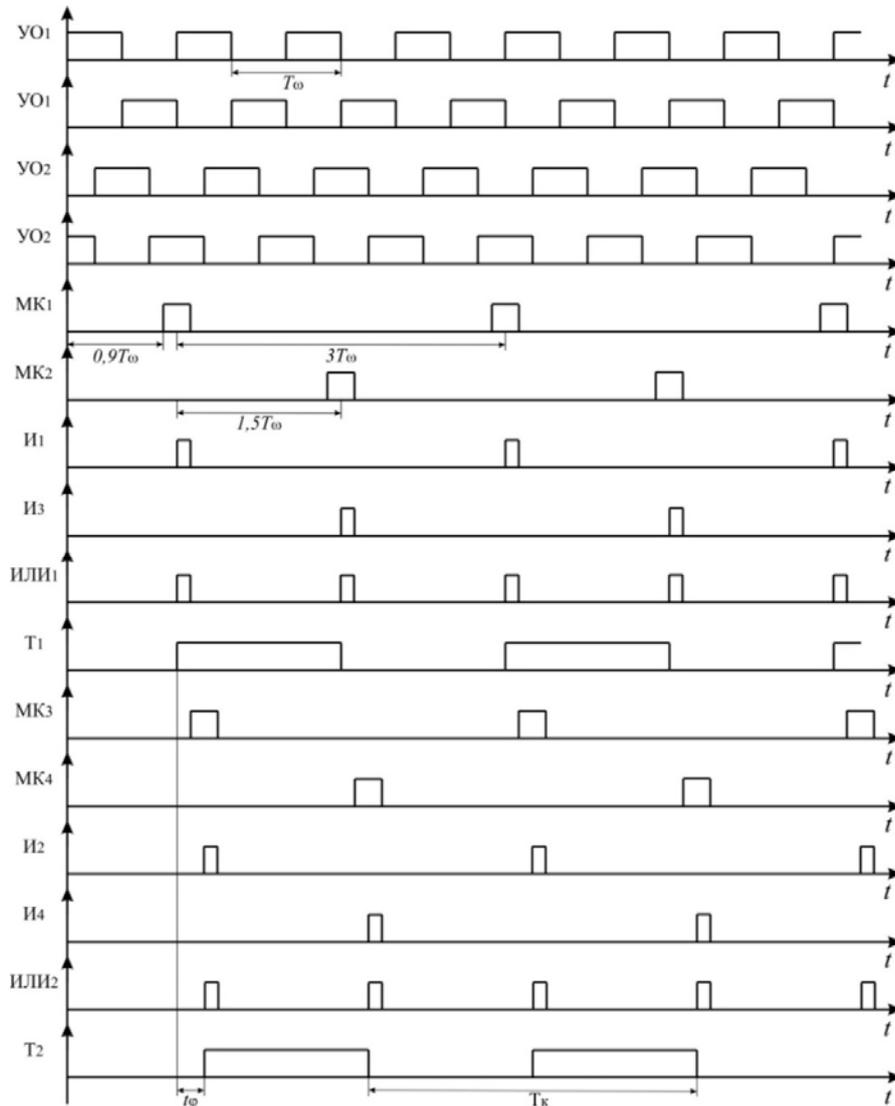


Рис. 5. Временная диаграмма КФП

Временная расстановка управляющих сигналов следующая. Первый импульс с выхода 1 микроконтроллера 12 относительно начального импульса с прямого выхода усилителя-ограничителя 4 поступит на вход схемы «И» 13 с задержкой  $0,9T_\omega$  и далее будет поступать с периодичностью  $3T_\omega$ . Относительно импульсов с выхода 1 микроконтроллера 12 первый импульс с выхода 2 поступает на схему «И» 15 с задержкой  $1,5T_\omega$  и далее будет поступать с периодичностью  $3T_\omega$ . Аналогично формируются управляющие сигналы с выходов 3 и 4 микроконтроллера 12, только относительно начального импульса с прямого выхода усилителя-ограничителя 5.

Длительность управляющих сигналов составляет примерно  $0,2T_\omega$ . Это означает, что поступление управляющих сигналов на схемы «И» 13, 14, 15 и 16 наступает раньше и заканчивается несколько позже прохождения через указанные схемы фронтов выходных сигналов (обеих полярностей) с усилителей-ограничителей 4 и 5. Такая временная расстановка управляющих сигналов  $T_y$  является ключевой при оптимизации способа синхронизации коммутируемых сигналов. При этом необходимо заметить, что управляющие сигналы с микроконтроллера 12 только дают разрешение, не оказывая никакого дестабилизирующего фактора на сам процесс прохождения импульсов с усилителей-ограничителей 4 и 5. А это означает, что фронты выходных импульсов обеих схем «ИЛИ» 17 и 18 жестко синхронизированы сигналами с прямых и инверсных выходов усилителей-ограничителей 4 и 5. Длительность сигналов выходных триг-

геров 6 и 7 составляет  $1,5T_0$ . Следовательно, предложенное техническое решение реализует двухполярный принцип работы преобразователя, обеспечивая расширение его фазовой характеристики до  $3\pi$ . При этом схемотехника КФД реализована с применением потенциальных логических схем «И» и «ИЛИ», что с учетом их полной симметрии обеспечивает предельно достижимую фазовую идентичность обоих каналов преобразователя. Например, учитывая, что типичное значение времени задержки распространения сигналов для эмиттерно-связанной логики составляет 350 пс, можно утверждать, что фазовая асимметрия данного коммутационного преобразователя фазовых сдвигов в диапазоне частот до 1 МГц составляет тысячные доли градуса.

Из приведенного анализа следует, что объединяющим элементом в схемотехнике как двухканального коммутатора, так и ключевого ФД является микроконтроллер. Это обобщение можно распространить также на последующее преобразование фазовых интервалов  $\Delta t_\phi$  в цифровой код с возможностью установления длительности измерительных интервалов, равных целочисленному значению периодов коммутируемых сигналов. Однако прежде, чем детализировать этот вопрос, необходимо отметить одно замечание, касающееся обобщенной схемы на рис. 1. Связано это с обработкой выходных импульсов КФД при прохождении опорного сигнала  $U_2(t)$  через измерительный канал. Очевидно, что длительность импульсов  $\Delta t_1$  в этот такт минимальна и определяется только фазовой неидентичностью измерительного и опорного каналов. Обработка таких импульсов при любом способе интегрирования технически затруднена.

Решение этой задачи возможно через включение в измерительный канал управляемого микроконтроллером фазовращателя, что позволяет отодвинуть «нулевую» точку примерно на  $45^\circ$ . На рис. 6 приведена схема фазовращателя с применением цифровых потенциометров и коммутируемых конденсаторов. Параметры этих элементов должны быть таковы, чтобы во всем частотном диапазоне обеспечивать соотношение  $\omega RC \approx 1$ , при котором  $K_U = \frac{1}{N_2}$ ,  $\varphi_U = -45^\circ$ .

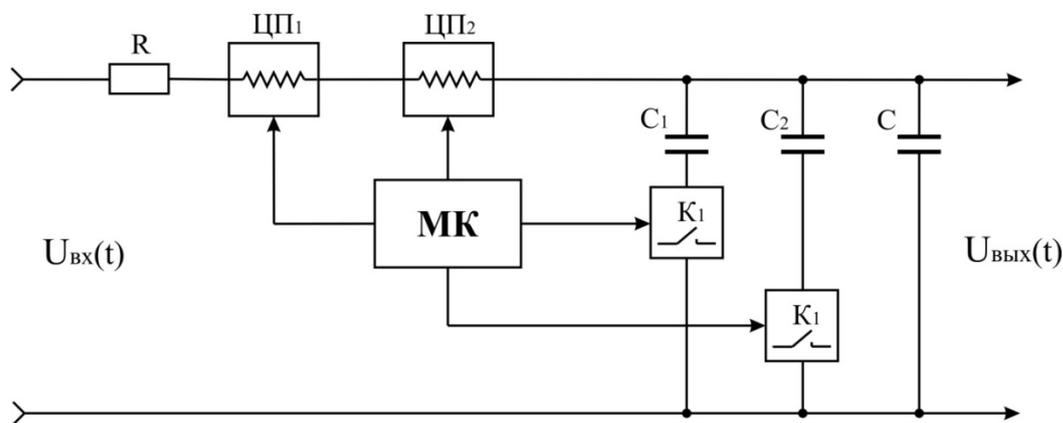


Рис. 6. Структурная схема управляемого фазовращателя

В заключении рассмотрим коммутационный цифровой фазометр (рис. 7) с интегрированными в его структуру приведенными выше элементами. Принцип действия фазометра основан на высокочастотной дискретизации выходных импульсов КФД в течение целочисленного значения периодов входных сигналов. Непосредственно процесс квантования синхронизируется микроконтроллером, осуществляющим управление, синхронизацию, математическую обработку с выдачей результатов измерения на регистрирующее устройство. Анализатор включает переключатель  $\Pi_\Omega$ , состоящий из двух ключей  $K_1$  и  $K_2$ , генератора коммутационных импульсов  $\Gamma_\Omega$ , содержащий два триггера  $T_1$  и  $T_2$ , два формирователя импульсов  $\Phi И_1$  и  $\Phi И_2$ , и четыре логические схемы  $И_1$ ,  $И_2$ ,  $И_3$ ,  $И_4$ , подключенные соответствующим образом к управляющим входам и выходам микроконтроллера.

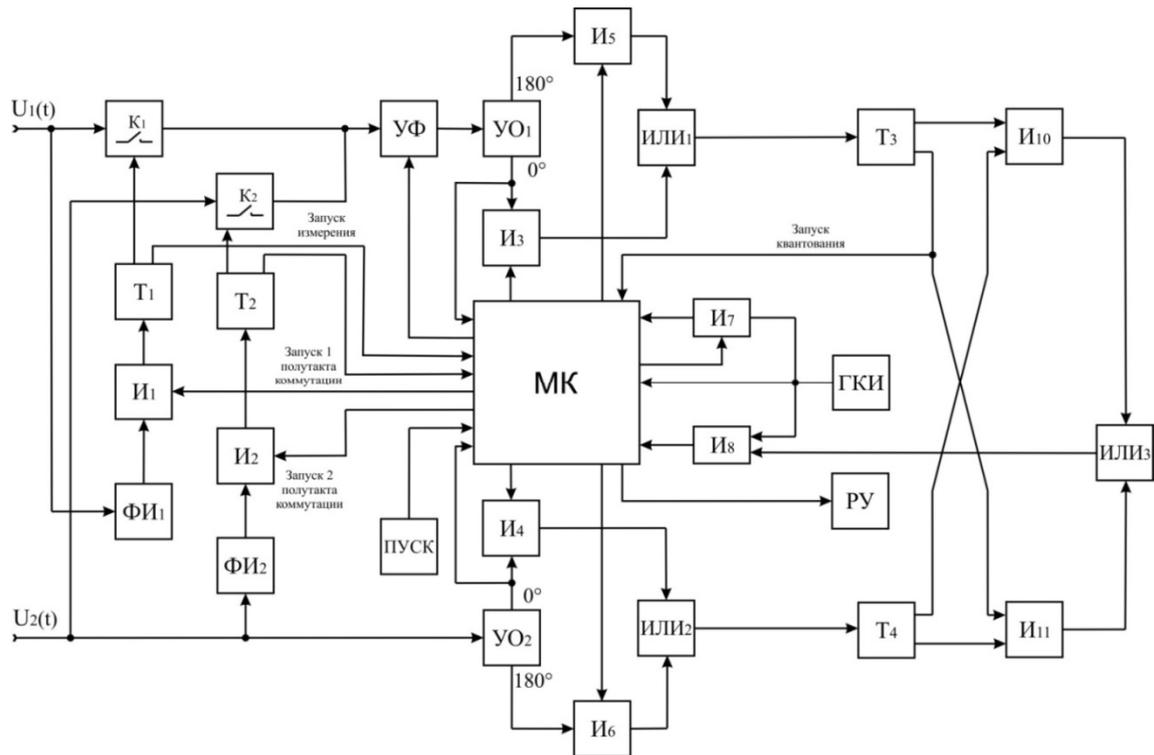


Рис. 7. Структурная схема фазового анализатора

Коммутационный фазовый преобразователь выполнен по двухполярной схеме [13] и включает управляемый фазовращатель УФ, два усилителя-ограничителя УО<sub>1</sub> и УО<sub>2</sub>, логические схемы И<sub>3</sub>, И<sub>4</sub>, И<sub>5</sub>, И<sub>6</sub>, И<sub>10</sub>, И<sub>11</sub>, логические схемы ИЛИ<sub>1</sub>, ИЛИ<sub>2</sub>, ИЛИ<sub>3</sub> и два триггера со счетным входом Т<sub>3</sub> и Т<sub>4</sub>. Квантование временных интервалов  $t_\phi$  и  $T$  осуществляется генератором квантовых импульсов (ГКИ), подключенным к сигнальным входам двух логических схем И<sub>7</sub> и И<sub>8</sub>.

Принцип действия анализатора следующий. В соответствии с коммутационными методами измерения фазовых сдвигов весь цикл измерения состоит из двух тактов. При этом в исходном состоянии оба триггера Т<sub>1</sub> и Т<sub>2</sub> и переключатели К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub>, а также логические схемы И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub>, И<sub>3</sub>, И<sub>4</sub> находятся в выключенном закрытом состоянии. По сигналу «Пуск» с микроконтроллера МК на схему И<sub>3</sub> поступает разрешающий сигнал «Запуск коммутации», фиксирующий поступление в микроконтроллер импульсов с формирователя ФИ<sub>1</sub>. Далее микроконтроллер с некоторой задержкой выдает разрешающий сигнал на схему И<sub>1</sub>, позволяющий очередному импульсу с формирователя ФИ<sub>1</sub> опрокинуть триггер Т<sub>1</sub> в противоположное положение. Сигнал с одного из выходов триггера Т<sub>1</sub> переводит переключатель К<sub>1</sub> в замкнутое положение, одновременно сигнал с другого выхода триггера Т<sub>1</sub> фиксирует в микроконтроллере МК начало первого такта измерения разности фаз двух сигналов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ . Процесс формирования фазовых интервалов  $t_\phi$  подробно рассмотрен при анализе структуры КФП (рис. 4), а вот процесс квантования временных интервалов  $t_\phi$  требует некоторого пояснения. Непосредственно процесс квантования синхронизируется импульсом «Запуск квантования», поступающим в микроконтроллер МК с одного из выходов триггера Т<sub>3</sub>. Этот сигнал запускает подпрограмму «Квантование», по которой в зависимости от частоты исследуемых сигналов задается оптимальное число  $K$  периодов квантования  $T_k$  (где  $T_k$  – период выходных импульсов триггеров Т<sub>3</sub> и Т<sub>4</sub>). При этом в микроконтроллер МК через логические схемы И<sub>7</sub> и И<sub>8</sub> в течение времени первого такта  $KT_k$  поступает количество импульсов:

$$N_{\phi 1} = 2Kt_\phi f_{\text{кв}}, \quad (4)$$

$$N_T = KT_k f_{\text{кв}}. \quad (5)$$

Здесь в формуле (5) коэффициент 2 определяется двухполупериодным принципом формирования фазовых интервалов.

С учетом, что  $T_k = 3T$ , где  $T$  – период входного сигнала, результат измерения определяется из формулы  $\varphi_1 = 360^\circ \cdot \frac{N_{\varphi 1}}{N_m} = 360^\circ \cdot \frac{t_{\varphi 1}}{3T}$ . Из анализа этой формулы следует, что в данном

анализаторе отсутствует низкочастотная погрешность время-импульсного преобразования фазовых сдвигов, так как время измерения  $KT_k$  кратно периоду входных сигналов, что является условием ее исключения.

С окончанием подпрограммы «Квантование» на схему И<sub>1</sub> поступает с МК разрешающий сигнал и очередной импульс с формирователя ФИ<sub>1</sub> опрокидывает триггер  $T_1$  в первоначальное исходное положение. С этого момента микроконтроллер переходит ко второму такту измерительного цикла. Последовательность действия здесь аналогична первому такту, только с учетом, что в этом такте участвуют элементы ФИ<sub>2</sub>,  $T_2$  и схема И<sub>2</sub>. С переключением триггера  $T_2$  открывается ключ  $K_2$ , а также со второго его выхода в микроконтроллер приходит сообщение о начале второго такта измерительного процесса, при котором в обоих каналах измерителя задействован сигнал  $U_2(t)$ . Это означает, что результат измерения второго такта характеризует фазовую и амплитудную неидентичность обоих каналов в анализаторе и определяется по

формуле  $\varphi_2 = 360^\circ \cdot \frac{N_{\varphi 2}}{N_m}$ , а общий результат обоих тактов равен  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ . Это означает,

что в данном фазоизмерителе отсутствует методическая низкочастотная погрешность, а также аддитивная погрешность  $\varphi_2$ , вычитаемая из результата первого такта измерения  $\varphi_1$ .

### Заключение

Из анализа рассмотренного материала следует:

1. Микроконтроллер является объединяющим системным цифровым синхронизатором в схемотехнике программно-конфигурируемом измерительном тракте коммутационно-тактовой фазоизмерительной аппаратуры.

2. Применение микроконтроллера в двухканальном коммутаторе гармонических сигналов позволило решить проблему оперативного изменения частоты переключателя сигналов, адаптированной к значению частоты коммутируемых сигналов.

3. Реализация КФП с использованием микроконтроллера позволило реализовать двухполярный принцип действия преобразователя с расширением его фазовой характеристики до  $3\pi$ .

4. Применение микроконтроллеров позволило реализовать в цифровом коммутационном фазометре программируемый способ синхронизации двухканального коммутатора и коммутационного фазового преобразователя с формирователем измерительных интервалов, равных целочисленному значению периодов исследуемых сигналов, что с учетом симметрии и идентичности каналов преобразования обеспечивает наивысшую точность измерения фазовых сдвигов.

### Список литературы

1. Комолов В. П., Трофименко И. Т. Квантование фазы при обнаружении сигналов. М. : Сов. радио, 1976. 224 с.
2. Опенхайм А. В., Лим Дж. С. Важность фазы при обработке сигналов // ТНИЭР. 1981. Т. 69, № 5. С. 39–54.
3. Глинченко А. С., Кузнецкий С. С., Финштейн А. М., Чмых М. К. Цифровые методы измерения сдвига фаз. Новосибирск : Наука, 1979. 288 с.
4. Григорьян Р. Л., Скрипник Ю. А., Шалдыкин О. К. Анализаторы характеристик радиоэлектронных устройств. Киев : Техника, 1981. 248 с.
5. Шалдыкин О. К., Григорьян Р. Л. К вопросу увеличения быстродействия одноканальных дифференциальных индикаторов // Вопросы улучшения технических параметров выпрямительных и транзисторных приборов. Л. : ВНИИЭП, 1970.
6. Григорьян Р. Л., Диденко В. А., Скрипник Ю. А. Влияние переходных процессов в широкополосном усилителе на точность коммутационного фазометра // Электрические и магнитные измерения. Киев : Наук. думка, 1977.
7. АС СССР 571902. Двухканальный коммутатор гармонических сигналов / Григорьян Р. Л., Скрипник Ю. А. № 2355489/21 ; заявл. 19.05.76 ; опубл. 05.09.77, Бюл. № 33.

8. АС СССР № 790303. Двухканальный коммутатор гармонических сигналов / Григорьян Р. Л., Дудкин В. Н., Решетников Ю. А., Скрипник Ю. А. № 2712544/18-21 ; заявл. 12.01.79 ; опубл. 23.12.80, Бюл. № 47.
9. Патент РФ 2757805. Двухканальный коммутатор гармонических сигналов / Григорьян Л. Р. № 2021105122 ; заявл. 25.02.2021 ; опубл. 21.10.2021.
10. АС СССР 504985. Коммутационный преобразователь разности фаз / Григорьян Р.Л. [и др.]. № 2040438/26-21 ; заявл. 02.07.74 ; опубл. 28.02.76, Бюл. № 8.
11. АС СССР 655986. Коммутационный преобразователь разности фаз / Григорьян Р. Л. [и др.]. ; опубл. 14.12.1978.
12. Патент РФ 2745700. Коммутационный преобразователь фазовых сдвигов / Григорьян Л. Р. № 2020120321 ; заявл. 15.06.2020 ; опубл. 30.03.2021.
13. Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. Новые схемотехнические решения в практике коммутационных фазовых измерений // Перспективные технологии в средствах передачи информации : материалы 14-ой Междунар. науч.-техн. конф. (г. Владимир, 6–7 октября 2021 г.). Владимир : ВлГУ, 2021. С. 307–310.

### References

1. Komolov V.P., Trofimenko I.T. *Kvantovanie fazy pri obnaruzhenii signalov = Phase quantization in signal detection*. Moscow: Sov. radio, 1976:224. (In Russ.)
2. Oppenkaym A.V., Lim Dzh.S. The importance of phase in signal processing. *TNIER = TNIER*. 1981;69(5):39–54. (In Russ.)
3. Glinchenko A.S., Kuznetskiy S.S., Finshteyn A.M., Chmykh M.K. *Tsifrovye metody izmereniya sdviga faz = Digital methods for measuring phase shift*. Novosibirsk: Nauka, 1979:288. (In Russ.)
4. Grigor'yan R.L., Skripnik Yu.A., Shaldykin O.K. *Analizatory kharakteristik radioelektronnykh ustroystv = Analyzers of characteristics of radio-electronic devices*. Kiev: Tekhnika, 1981:248. (In Russ.)
5. Shaldykin O.K., Grigor'yan R.L. On the issue of increasing the speed of single-channel differential indicators. *Voprosy uluchsheniya tekhnicheskikh parametrov vypryamitel'nykh i tranzistornykh priborov = Issues of improving the technical parameters of rectifier and transistor devices*. Leningrad: VNIIEP, 1970. (In Russ.)
6. Grigor'yan R.L., Didenko V.A., Skripnik Yu.A. The influence of transients in broadband amplifiers on the accuracy of the switching phase meter. *Elektricheskie i magnitnye izmereniya = Electrical and magnetic measurements*. Kiev: Nauk. dumka, 1977. (In Russ.)
7. AS SSSR 571902. *Dvukhkanal'nyy kommutator garmonicheskikh signalov = Two-channel harmonic signal switchboard*. Grigor'yan R.L., Skripnik Yu.A. No. 2355489/21; appl. 19.05.76; publ. 05.09.77, bull. № 33. (In Russ.)
8. AS SSSR 790303. *Dvukhkanal'nyy kommutator garmonicheskikh signalov = Two-channel harmonic signal switchboard*. Grigor'yan R.L., Dudkin V.N., Reshetnikov Yu.A., Skripnik Yu.A. No. 2712544/18-21; appl. 12.01.79; publ. 23.12.80, bull. № 47. (In Russ.)
9. Patent RF 2757805. *Dvukhkanal'nyy kommutator garmonicheskikh signalov = Two-channel harmonic signal switchboard*. Grigor'yan L.R. No. 2021105122; appl. 25.02.2021; publ. 21.10.2021. (In Russ.)
10. AS SSSR 504985. *Kommutatsionnyy preobrazovatel' raznosti faz = Switching phase difference converter*. Grigor'yan R.L. et al. No. 2040438/26-21; appl. 02.07.74; publ. 28.02.76, bull. № 8. (In Russ.)
11. AS SSSR 655986. *Kommutatsionnyy preobrazovatel' raznosti faz = Switching phase difference converter*. Grigor'yan R.L. et al.; publ. 14.12.1978. (In Russ.)
12. Patent RF 2745700. *Kommutatsionnyy preobrazovatel' fazovykh sdvigov = Switching phase shift converter*. Grigor'yan L.R. No. 2020120321; appl. 15.06.2020; publ. 30.03.2021. (In Russ.)
13. Grigor'yan L.R., Bogatov N.M., Grigor'yan R.L. New circuit solutions in the practice of switching phase measurements. *Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii: materialy 14-oy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Vladimir, 6–7 oktyabrya 2021 g.) = Promising technologies in the media of information transmission : materials of the 14th International scientific and technical conference. conf.* Vladimir: VIGU, 2021:307–310. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Леонтий Рустемович Григорьян

кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры физики  
и информационных систем,  
Кубанский государственный университет  
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)  
E-mail: leonmezon@mail.ru

#### Leonty R. Grigoryan

Candidate of physical and mathematical sciences,  
associate professor, associate professor  
of the sub-department of physics  
and information systems,  
Kuban State University  
(149 Stavropolskaya street, Krasnodar, Russia)

**Николай Маркович Богатов**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой физики  
и информационных систем,  
Кубанский государственный университет  
(Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149)  
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

**Nikolay M. Bogatov**

Doctor of physical and mathematical sciences,  
professor, head of the sub-department  
of physics and information systems,  
Kuban State University  
(149 Stavropolskaya street, Krasnodar, Russia)

**Рустем Леонтьевич Григорьян**

кандидат технических наук,  
исполнительный директор,  
Научно-производственная фирма «Мезон»  
(Россия, г. Краснодар, ул. Солнечная, 10)  
E-mail: mezon\_kub@mail.ru

**Rustem L. Grigoryan**

Candidate of technical sciences,  
executive director,  
Scientific and production company "Mezon"  
(10 Solnechnaya street, Krasnodar, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 26.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.12.2022**

**Принята к публикации/Accepted 20.01.2023**

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

УДК 621.382

doi:10.21685/2307-5538-2023-1-7

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР

Е. А. Печерская<sup>1</sup>, С. А. Гурин<sup>2</sup>, М. Д. Новичков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2,3</sup> Пензенский научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

<sup>1</sup>pea1@list.ru, <sup>2</sup>teslananoel@rambler.ru, <sup>3</sup>novichkov1998maks@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальность темы исследования обусловлена развитием радиоэлектронной аппаратуры, требующей повышения уровня электрических параметров электронно-компонентной базы. Целью работы является исследование и поиск оптимальных режимов высокотемпературного отжига многослойных тонкопленочных резистивных структур. *Материалы и методы.* Многослойные тонкопленочные резисторы получены методом термического вакуумного напыления нихрома Х20Н75Ю и кермета К-20С на установке УВН-71. *Результаты.* Представлены результаты исследования процессов, происходящих в структуре и на границе раздела пленок в многослойных тонкопленочных резисторах в результате воздействия высоких температур в вакууме и на воздухе, их влияние на необратимое изменение сопротивления и температурный коэффициент сопротивления. *Выводы.* Получены технологические режимы высокотемпературного отжига, расширяющие подгоночный ресурс многослойных тонкопленочных резисторов до 20 %, при нестабильности сопротивления не превышающей 0,4 %.

**Ключевые слова:** тонкопленочный резистор, высокотемпературный отжиг, термостабилизация, сопротивление, температурный коэффициент сопротивления

**Для цитирования:** Печерская Е. А., Гурин С. А., Новичков М. Д. Высокотемпературный отжиг многослойных резистивных структур // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 56–61. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-7

## HIGH-TEMPERATURE ANNEALING OF MULTILAYER RESISTIVE STRUCTURES

E.A. Pecherskaya<sup>1</sup>, S.A. Gurin<sup>2</sup>, M.D. Novichkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2,3</sup> Penza Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

<sup>1</sup>pea1@list.ru, <sup>2</sup>teslananoel@rambler.ru, <sup>3</sup>novichkov1998maks@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The relevance of the research topic is due to the development of radio-electronic equipment, which requires an increase in the level of electrical parameters of the electronic component base. The aim of the work is to study and search for optimal modes of high-temperature annealing of multilayer thin-film resistive structures. *Materials and methods.* Multilayer thin-film resistors were obtained by thermal vacuum spraying of nichrome X20CrNi75Al and kermet K-20S at the UVN-71 installation. *Results.* The results of the study of processes occurring in the structure and at the interface of films in multilayer thin-film resistors as a result of exposure to high temperatures in vacuum and in air, their effect on the irreversible change in resistance and temperature coefficient of resistance are presented. *Conclusions.* Technological modes of high-temperature annealing have been obtained that extend the fitting life of multilayer thin-film resistors up to 20 %, with resistance instability not exceeding 0,4 %.

**Keywords:** thin-film resistor, high-temperature annealing, thermal stabilization, resistance, temperature coefficient of resistance

**For citation:** Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. High-temperature annealing of multilayer resistive structures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):56–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-7

### Введение

Тонкопленочные резисторы, полученные вакуумным напылением, содержат большое количество структурных дефектов, обуславливающих квазиравновесное состояние тонкой пленки [1], приводя к временной и температурной нестабильности электрических сопротивлений. Для стабилизации параметров используют методы высокоэнергетической обработки, направленные на изменение структуры тонких пленок, путем отжига на воздухе и в вакууме [2].

Основные процессы, протекающие в тонкой пленке при высокотемпературном отжиге, можно условно разделить на две группы: 1) отжиг дефектов, рекристаллизация, коалесценция, уплотнение; 2) окисление поверхности и на границах зерен [3–5]. Все эти процессы повышают стабильность выходных параметров тонкопленочных резистивных структур, однако влияние на сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) оказывают противоположное. Так, процессы, относящиеся к первой группе, ведут к росту металлической проводимости, а следовательно, снижению сопротивления и смещению ТКС в сторону положительных значений. Окисление же приводит к росту сопротивления и смещению ТКС в сторону отрицательных значений вследствие увеличения доли туннельного механизма проводимости [6].

Добавление дополнительных слоев тонких пленок (контактных, компенсационных, диэлектрических) в значительной степени уменьшает либо полностью исключает свободную площадь резистивного слоя, доступную для проникновения активных газов, в том числе кислорода, что резко снижает вклад окисления в стабильность электрических параметров [7]. В многослойных тонкопленочных структурах процессы деградации в большей степени наблюдаются из-за взаимной диффузии и образования новых соединений на границе раздела пленок [8].

Принимая во внимание необратимое изменение сопротивления и ТКС при выполнении высокотемпературного отжига, операции термообработки можно разделить на две группы в зависимости от решаемой задачи: стабилизирующий отжиг и формирующий требуемое значение сопротивления и ТКС. Исходя из этого, данная работа преследовала цель получить технологические режимы высокоэнергетической обработки многослойных тонкопленочных резисторов (ТПР), расширяющие подгоночный ресурс резистора и обеспечивающие температурную и временную стабильность электрических сопротивлений за счет достижения термодинамического равновесия и устойчивых соединений в структуре и на границе раздела пленок.

### Методика эксперимента

При формировании многослойной тонкопленочной резистивной структуры для получения технологических режимов высокотемпературного отжига на первом этапе разработки определялись материалы ТПР. Предпочтение при выборе пары материалов отдавалось следующим критериям: металлургическая совместимость, разнонаправленность кривых старения, противоположность знаков и близость значений ТКС по модулю. Наиболее полно удовлетворяющей всем требованиям парой материалов являются металлосилицидный сплав К-20С и нихром Х20Н75Ю, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры материалов ТПР

Материал	$R$ , Ом/□	$\alpha$ , $K^{-1} \cdot 10^{-6}$	$P_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\% R_{ст.}^*$
К-20С	200–700	–100..0	2	–1
Нихром	20–300	0...+50	2	1

Примечание: \* – после 1000 ч работы под нагрузкой 1 Вт/см<sup>2</sup> при 85 °С.

Слабым звеном нихромовых пленок является их чувствительность к влаге, в результате воздействия которой резистивные дорожки вытравливаются за счет электрохимической кор-

розии [9]. На рис. 1 представлен процесс растворения резистивного слоя под действием электролитической коррозии в области положительного контакта с образованием электроизолирующих продуктов.

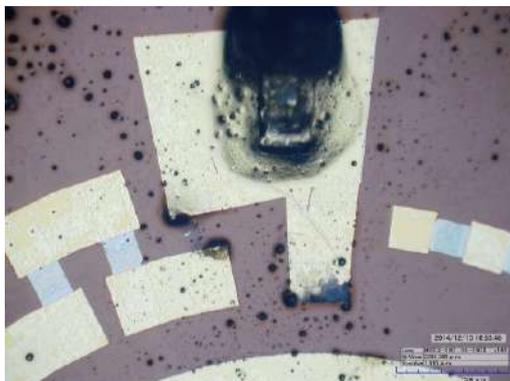


Рис. 1. Растворение части ТПР под действием электролитической коррозии в результате влаги и загрязнений на поверхности сформированной схемы

Чтобы избежать показанных дефектов, пленка из нихрома была напылена первой. Таким образом, пленка из К-20С, формируемая вторым слоем и полностью закрывающая доступ влаги и загрязнений к тонкой пленке Х20Н75Ю, помимо компенсационной функции, являлась также и пассивирующим слоем по отношению к нихрому. Резистивные пленки были получены на установке вакуумного напыления УВН-71ПЗ в едином технологическом цикле по режимам, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Режимы напыления многослойного ТПР

Слой	Ток испарителя $I_{\text{испар}}$ , А	Начальное остаточное давление в камере $P_{\text{ост нач}}$ , мм рт. ст.	Конечное остаточное давление в камере $P_{\text{ост кон}}$ , мм рт. ст.	Температура подложки, $T_{\text{подл}}$ , °С	Сопротивление контрольного образца кОм/□	Время напыления, с
Х20Н75Ю	280–350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	350	2,4	60
К-20С	480–500	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	380	1,2	200–280

Контактные площадки из алюминия удельным поверхностным сопротивлением 0,2 Ом/□ и толщиной порядка 1 мкм с подслоем оксида алюминия для выполнения дальнейших замеров формировались напылением через свободную маску.

Исследуемые в настоящей работе образцы многослойных ТПР подвергались различным типам термообработок:

- отжиг на воздухе при температуре 475 °С в течение 5 мин;
- отжиг в вакууме при температуре 475 °С в течение 5 мин;
- циклический отжиг в вакууме, нагрев до 475 °С и остывание до 25 °С, не менее 3 циклов;
- комбинированные отжиг на воздухе и в вакууме при температуре 475 °С с выдержкой в течение 5 мин;
- ступенчатый отжиг на воздухе от 350 до 475 °С с шагом 25 °С и выдержкой в течение 5 мин;
- ступенчатый отжиг в вакууме от 350 до 475 °С с шагом 25 °С и выдержкой в течение 5 мин.

Температурный диапазон 350 до 475 °С выбран из условия достаточности температурного воздействия для завершения процессов окислобразования и рекристаллизации, без снижения адгезии между слоями тонких пленок [10]. Для снятия напряжений от локальных микропластических деформаций, вызванных образованием внутрислоевых окислов, силицидов и других соединений в результате операции высокотемпературного отжига, производилась

дополнительная изотермическая выдержка всех исследуемых образцов на воздухе при температуре 200 °С в течение 8 ч.

### Результаты и их обсуждение

Результаты измерения сопротивления и ТКС многослойных ТПР до и после проведения высокотемпературного отжига по различным технологическим режимам приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние термотренировок на выходные параметры ТПР

Параметр	Отжиг на воздухе	Отжиг в вакууме	Циклический отжиг в вакууме	Комбинированный отжиг	Ступенчатый отжига на воздухе	Ступенчатый отжиг в вакууме
$R$ , Ом	100,88	102,86	100,58	98,60	98,03	99,61
$\Delta R$ , %	-15	-17	-20	-18	-17	-21
$\alpha$ , $K^{-1} \cdot 10^{-6}$	-16	-15	-18	-15	-18	-17
$\Delta\alpha$ , $K^{-1} \cdot 10^{-6}$	+33	+34	+39	+37	+34	+39

Временная нестабильность сопротивления резистивных пленок оценивалась выдержкой в печи при температуре 150 °С в течение 45 сут. Измерения производились каждые 5 сут. По полученным результатам построены кривые старения, представленные на рис. 2.

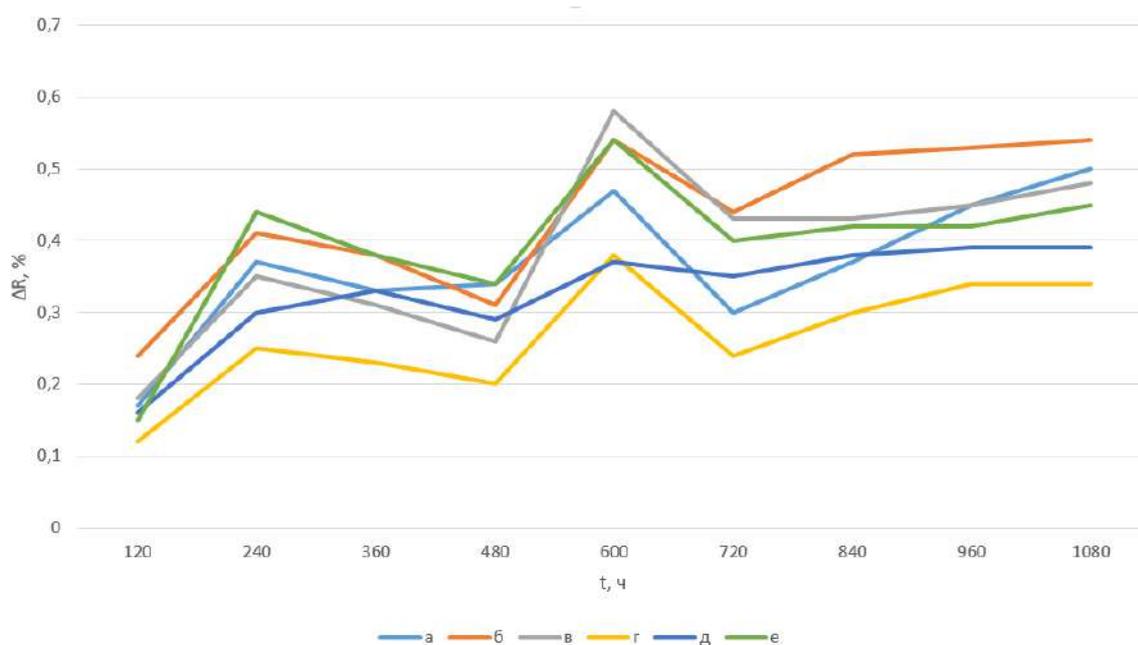


Рис. 2. Кривые старения тонких пленок: *a* – кривые старения тонких пленок, подвергнутых отжигу на воздухе; *б* – в вакууме; *в* – циклическому отжигу в вакууме; *г* – комбинированному отжигу; *д* – ступенчатому отжигу на воздухе; *е* – ступенчатому отжигу

Исходя из данных в табл. 3, можно заключить, что при высокотемпературном отжиге наблюдаются снижение сопротивления ТПР до 20 % и смещение ТКС, достигающее области положительных значений, свидетельствуя о превалировании процессов рекристаллизации, коалесценции, уплотнения тонкопленочной структуры и отжига дефектов над окислением на поверхности и границах зерен. Полученный результат объясняется относительно большой толщиной резистивной структуры и пассивирующей функцией тонкой пленки кермета К-20С.

Так как изменение электрических параметров вызвано увеличением доли металлического механизма проводимости, то наибольших результатов удается достичь при отжиге в отсутствии активных газов, реагирующих с резистивной структурой, а именно, в вакууме, что подтверждается полученными результатами. В то же время отжиг на воздухе приводит к

образованию поверхностной окисной пленки, положительно влияющей на стабильность резистора.

Оптимальные результаты были получены при комбинированном отжиге в вакууме и на воздухе. В результате изменений в структуре ТПР при отжиге в вакууме пленка уплотняется, затрудняя дальнейший окисный рост на границах зерен. По этим причинам при отжиге на воздухе рост окислов происходит преимущественно на поверхности, тем самым повышая стабильность резистора, не приводя к значительному росту туннельного механизма проводимости.

Временная нестабильность многослойных резистивных структур, не превысившая 0,4 % в ходе ускоренных испытаний на сохраняемость в течение 45 сут, подтверждает достижение термодинамического равновесия и устойчивых соединений в структуре и на границе раздела пленок в результате высокотемпературного отжига.

### Заключение

На основе выявленных закономерностей необратимого изменения сопротивления и ТКС многослойных резистивных структур в результате воздействия высоких температур установлено, что, варьируя технологические режимы высокотемпературного отжига, удастся расширить подгоночный ресурс ТПР. Наибольшее отклонение сопротивления и ТКС наблюдается при отжиге в вакууме. Однако резисторы, прошедшие термообработку на воздухе, показали более высокую стабильность. Сочетание этих методов, дающее оптимальный результат, позволяет добиться необратимого изменения сопротивления ТПР на 20 % и смещения ТКС в область положительных значений, при нестабильности сопротивления не превышающей 0,4 %.

### Список литературы

1. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление параметрами резистивных структур посредством отжига // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 144–145.
2. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. 2008. 172 с.
3. Сергеев В. Е., Воротынцев В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.
4. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> materials for phase-change neuron synaptic devices // Journal of Alloys and Compounds. 2022. № 892. P. 162148.
5. Myagkov V. G., Zhigalov V. S., Bykova L. E. [et al.]. Solid-phase synthesis of L10-FePd(001) epitaxial thin films: Structural transformations and magnetic anisotropy // JETP Letters. 2010. № 91. P. 481–485.
6. Смолин В. К. Модификация свойств резистивных элементов термической обработкой // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 3. С. 180–186. doi:10.17587/nmst.19.180-186
7. Гурин С. А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 157 с.
8. Бэглин Дж., Поут Дж. Взаимодиффузия в системах металл-металл // Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Майера. М. : Мир, 1982. С. 309–360.
9. Волохов И. В. Исследование технологий получения многослойных гетероструктур с применением различных методов осаждения в вакууме изолирующих покрытий на корпусные элементы датчиков-преобразующей аппаратуры для авиационно-космической техники // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 1. С. 30–39.
10. Гурин С. А., Песков Е. В., Вергазов И. Р. Методика термостабилизации тонкопленочных гетерогенных структур // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 12–16.

### References

1. Averin I.A., Pecherskaya R.M. Control of parameters of resistive structures by annealing. Trudy *Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:144–145. (In Russ.)
2. Lugin A.N. *Konstruktorsko-tehnologicheskie osnovy proektirovaniya tonkoplenochnykh pretsizionnykh rezistorov* = *Design and technological fundamentals of designing thin-film precision resistors*. 2008:172. (In Russ.)

3. Sergeev V.E., Vorotyntsev V.M. Development of the modified technology of thermal stabilization of thin-film resistive elements. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2021;(1):4–9. (In Russ.)
4. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> materials for phase-change neuron synaptic devices. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;(892):162148.
5. Myagkov V.G., Zhigalov V.S., Bykova L.E. et al. Solid-phase synthesis of L10-FePd(001) epitaxial thin films: Structural transformations and magnetic anisotropy. *JETP Letters*. 2010;(91):481–485.
6. Smolin V.K. Modification of the properties of resistive elements by heat treatment. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2017;19(3):180–186. (In Russ.). doi:10.17587/nmst.19.180-186
7. Gurin S.A. Research and development of thin-film heterogeneous structures of sensitive elements of pressure sensors with extreme operating conditions. PhD dissertation. Saint Petersburg, 2016:157. (In Russ.)
8. Beglin Dzh., Pout Dzh. Mutual diffusion in metal-metal systems. *Tonkie plenki. Vzaimnaya diffuziya i reaktsii = Thin films. Mutual diffusion and reactions*. Moscow: Mir, 1982:309–360. (In Russ.)
9. Volokhov I.V. Investigation of technologies for obtaining multilayer heterostructures using various methods of vacuum deposition of insulating coatings on body elements of sensor-converting equipment for aerospace engineering. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2014;(1):30–39. (In Russ.)
10. Gurin S.A., Peskov E.V., Vergazov I.R. Method of thermal stabilization of thin-film heterogeneous structures. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2014;(11):12–16. (In Russ.)

#### *Информация об авторах / Information about the authors*

##### **Екатерина Анатольевна Печерская**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: peal@list.ru

##### **Ekaterina A. Pecherskaya**

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

##### **Сергей Александрович Гурин**

начальник лаборатории разработки  
и производства плат НР и ГИС (НПК-1),  
Пензенский научно-исследовательский  
институт электронно-механических приборов,  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: teslananoel@rambler.ru

##### **Sergey A. Gurin**

Head of the laboratory for the development  
of GIS, ADC and DAC resistor sets boards,  
Penza Scientific Research Institute of Electronic  
and Mechanical Devices  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

##### **Максим Дмитриевич Новичков**

инженер-технолог лаборатории разработки  
и производства плат НР и ГИС (НПК-1),  
Пензенский научно-исследовательский  
институт электронно-механических приборов,  
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)  
E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

##### **Maksim D. Novichkov**

Engineer-Technologist of the laboratory  
for the development of GIS, ADC  
and DAC resistor sets boards,  
Penza Scientific Research Institute of Electronic  
and Mechanical Devices  
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 24.10.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 24.11.2022**

**Принята к публикации / Accepted 23.12.2022**

# КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

## CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

УДК 629.7.01:519.24

doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

### МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭТАПЕ ИХ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ

М. А. Белокопытов<sup>1</sup>, К. В. Ушанев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>hommer1990@mail.ru, <sup>2</sup>stan\_007@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются существующие и перспективные космические аппараты. Предметом исследования являются контроль технического состояния и диагностирование бортовой аппаратуры космических аппаратов. Целью работы является разработка модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования, применение которой позволит повысить достоверность определения технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов на этапе их испытаний и применения. *Материалы и методы.* При разработке модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов основное внимание уделено методу, основанному на машинном обучении, который позволяет строить прогнозные модели с использованием как ретроспективных, так и текущих данных, поступающих в реальном времени с измерительной аппаратуры и получать неочевидные на первый взгляд закономерности. *Результаты.* Предложен подход к повышению достоверности определения технического состояния за счет применения интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Интеллектуализированность данной системы определяется наличием математической, алгоритмической, программной и инструментальной составляющих интеллектуальной поддержки лиц, принимающих решения при управлении космическими аппаратами. *Выводы.* Разработанная модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов позволяет расширить возможности космического аппарата за счет реализации функций корректировки алгоритмов работы бортового и специального программного обеспечения на основании результатов машинного обучения и нейросетевой обработки телеизмерений, способствующих более достоверному определению технического состояния бортовой аппаратуры. Предложенную модель предлагается использовать на этапах испытания и применения космических аппаратов для повышения достоверности определения технического состояния бортовой аппаратуры и оперативности принятия мер по предотвращению возникновения нештатных ситуаций.

**Ключевые слова:** контроль, диагностирование, бортовая аппаратура, космический аппарат, испытания, нештатная ситуация, система поддержки принятия решений

**Для цитирования:** Белокопытов М. А., Ушанев К. В. Модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов на этапе их испытаний и применения // Изменение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 62–69. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

## THE MODEL OF AN INTELLECTUALIZED SYSTEM ON-BOARD MONITORING AND DIAGNOSTICS SPACECRAFT INSTRUMENTS AT THE STAGE OF THEIR TESTING AND APPLICATION

M.L. Belokopytov<sup>1</sup>, K.V. Ushanev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> hommer1990@mail.ru, <sup>2</sup> stan\_007@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of research is existing and prospective spacecraft. The subject of the study is the control of the technical condition and diagnostics of the onboard equipment of spacecraft. The aim of the work is to develop a model of an intelligent monitoring and diagnostics system, the use of which will increase the reliability of determining the technical condition of the onboard equipment of spacecraft at the stage of their testing and application. *Materials and methods.* When developing a model of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft, the main attention is paid to a method based on machine learning, which allows you to build predictive models using both retrospective and current data received in real time from measuring equipment and obtain patterns that are not obvious at first glance. *Results.* An approach is proposed to increase the reliability of determining the technical condition through the use of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft. The intellectualization of this system is determined by the presence of mathematical, algorithmic, software and instrumental components of intellectual support for decision makers in the management of spacecraft. *Conclusions.* The developed model of an intelligent system for monitoring and diagnosing the onboard equipment of spacecraft makes it possible to expand the capabilities of the spacecraft by implementing the functions of correcting the algorithms of the onboard and special software based on the results of machine learning and neural network processing of television measurements, contributing to a more reliable determination of the technical condition of the onboard equipment. The proposed model is proposed to be used at the stages of testing and application of spacecraft to increase the reliability of determining the technical condition of on-board equipment and the efficiency of taking measures to prevent the occurrence of emergency situations.

**Keywords:** monitoring, diagnostics, on-board equipment, spacecraft, tests, emergency situation, decision support system

**For citation:** Belokopytov M.L., Ushanev K.V. The model of an intellectualized system on-board monitoring and diagnostics spacecraft instruments at the stage of their testing and application. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-8

### *Введение*

В настоящее время в Российской Федерации с учетом действующих политических, экономических и научно-технических факторов активно ведутся работы, направленные на обеспечение научно-методической базы для подготовки предложений в федеральные и ведомственные целевые программы, способные вывести отечественную космонавтику из перманентного предкризисного состояния и гарантировать минимально эффективное решение задач космической деятельности России уже с 2020 г., с ее наращиванием до паритетных мировому уровню – в период до 2030 г.

Одной из основных проблем, затрудняющих развитие космонавтики в РФ, является низкая оперативность и достоверность решения задач оценки технического состояния (ТС) космических аппаратов (КА) и диагностирования бортовых систем (БС) космических аппаратов при контроле и испытаниях космических систем (КС).

Связано это прежде всего с возрастающим количеством различного рода отказов и неисправностей БС КА из-за проблем обеспечения их качества и надежности, длительных сроков проведения летных испытаний, тестового режима функционирования при одновременном выполнении задач по предназначению и низкого качества электронной компонентной базы (ЭКБ) отечественного производства.

### *Материалы и методы*

Анализ современных отечественных и зарубежных подходов и методов контроля ТС БС КА показал, что методы, основанные на интеллектуальном анализе относительно

больших массивов данных, позволяют извлекать из имеющихся массивов телеметрических параметров закономерности и зависимости, позволяющие строить прогнозные модели на основе статистических методов. Данные методы дают хорошие результаты для выявления отказов и идентификации их локальных эффектов.

Наиболее перспективными являются методы, основанные на машинном обучении, позволяющие строить прогнозные модели с использованием как ретроспективных, так и текущих данных, поступающих в реальном времени с измерительной аппаратуры, и получать неочевидные на первый взгляд закономерности. Способность к обучению дает возможность оперативно корректировать параметры моделей прогнозирования при изменяющихся условиях функционирования КА, значительно минимизируя «простои» использования КА по целевому назначению (ЦН).

Одним из таких походов, способствующих более достоверному определению ТС БА КА, на взгляд авторов, является разработка системы технического диагностирования, специальное математическое обеспечение которой на основе анализа прогнозных значений контролируемых телеметрических параметров позволит решить задачу локализации неисправностей и минимизации неопределенности их появления без выдачи дополнительных управляющих воздействий, а также оценить остаточный ресурс БС КА.

С целью реализации данного подхода разработана модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применения.

### *Результаты и обсуждение*

Модель интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применения, структурно-функциональная схема которой представлена на рис. 1, предполагает дооснащение текущей системы контроля и диагностирования БА КА, основанной на информационном взаимодействии между центром управления полетами (ЦУП), главным конструктором, специальным потребителем и самим КА системой определения диапазонов параметров БА и предупреждения нештатных ситуаций (СОДПП).

Основными компонентами СОДПП являются:

- подсистема определения допустимых диапазонов параметров БА (подсистема 1);
- подсистема прогнозирования значений параметров БА (подсистема 2);
- блок обработки результатов и формирования корректировок в алгоритмах работы бортового комплекса управления (БКУ);
- центр обработки данных (ЦОД).

В данной системе диагностирования БА КА для парирования НШС, возникающих на борту КА, объем циркулирующей информации, необходимой для достоверного определения ТС, определяется на этапе разработки КС [1].

Основной информационный обмен разделен на направления между: КА и ЦУП; ЦУП и специальным потребителем; ЦУП и главным конструктором. Анализ и оценка ТС БА осуществляются по полному или ограниченному (при локализации НШС) потоку телеметрической информации (ТМИ). Также в направлении «Борт–Земля» БКУ при выявлении НШС, основываясь на заложенных «жестких» алгоритмах, может передавать информацию оперативного контроля (ИОК), в которой содержится информация о БА, работающей с отклонениями от параметров, указанных в эксплуатационной документации (ЭД), и сигнал «Вызов НКУ», говорящий о необходимости съема ТМИ и анализе ТС за счет диагностирования БА КА [2].

Сектор анализа ЦУП КА по результатам обработки ТМИ и на основании инструкции по оценке работы БС формирует предложения в систему управления для выдачи управляющих воздействий на борт КА, исходя из требований инструкции по организации управления КА в полете при возникновении НШС. При отсутствии в первой инструкции предложений по парированию формируется уведомление в адрес главного конструктора – в первую очередь, а во вторую – рекламационный акт (сообщение о неисправности). Спустя продолжительный срок в ЦУП поступают рекомендации по управлению и в последующем акт исследования, раскрывающий причины возникновения НШС, способы парирования, меры, исключающие возможное повторение данных отказов аналогичной БА.



В итоге в текущей системе контроля и диагностирования БА КА поиск и устранение неисправностей определяется алгоритмами и рекомендациями главного конструктора. Оперативность  $O$  при приведении КА в готовность к выполнению задач по ЦН связана со временем выявления НШС и принятием мер по недопущению достижения предельного состояния и может быть представлена в виде функции<sup>1</sup>

$$O = f(t_{\text{поиск}}; Q_{\text{изм}}; t_{\text{упр}}; D_{\text{реш}}). \quad (1)$$

Показателями, влияющими на оперативность, являются:

- $t_{\text{поиск}}$  – время поиска причин возникновения НШС и анализа;
- $Q_{\text{изм}}$  – полнота проводимых измерений при локализации НШС;
- $t_{\text{упр}}$  – время, необходимое на выдачу необходимых управляющих воздействий на БА КА;
- $D_{\text{реш}}$  – достоверность сформированного управляющего воздействия.

На этапах испытания и применения принятие решений о ТС БА КА и его управлении зависит в основном от главного конструктора, поскольку зачастую ЭД не позволяет полностью парировать возникающие НШС, а в большинстве возникающих случаев предлагаемые меры в виде отключения большей части бортовых систем направлены на исключение достижения ими предельного состояния.

Накопление данных в СОДПП от момента выведения КА до его закрытия предлагается осуществлять в центре обработки данных (ЦОД). При этом значение параметров БА КА, полученных в ходе съема ТМИ, хранятся в базе данных соответствующего ЦУП КА, а методы и алгоритмы их анализа сведены в единую базу знаний. Все данные предоставляются при соответствующем запросе как в адрес ЦУП, так и для подготовки предложений в системе поддержки и принятия решений [3], в том числе и при выборе критически важных параметров для оперативного диагностирования НШС [4].

На подсистему определения допустимых диапазонов параметров БА возлагаются функции по сбору статистических данных со значениями определенных параметров БА, которые требуются для подтверждения летных характеристик БА КА или являются основополагающими при выполнении задач по ЦН (напряжение аккумуляторных батарей, их температура, давление и температура на определенных участках в системе терморегулирования, параметры излучений специальной аппаратуры и т.д.) в изменяющихся условиях работы. По мере накопления статистики на основе машинного обучения и алгоритмов сравнения производится определение рабочих диапазонов значений параметров БА, соблюдение которых позволит избежать воздействия критических нагрузок на отдельные элементы БА КА, подверженные ускоренному выходу из строя.

Таким образом производится сужение допусков значений параметров БА, руководствуясь которыми, осуществляется ее более «бережное» использование, заблаговременное отключение при выходе за уточненные границы диапазонов значений параметров с целью недопущения предельного состояния и работы в критических нагрузках. Также возможно расширение допусков в случаях, если при этом не будет ускорена выработка ресурса БА, тем самым увеличив продолжительность применения КА по ЦН в особых условиях.

Комплекс средств автоматизации (КСА) определения допустимых диапазонов параметров БА в ЦУП в отличие от одноименного блока на борту дополнительно анализирует результаты качества выполнения задач целевой аппаратурой КА, что позволяет классифицировать значения параметров БА КА и определить, какие из них при нахождении в разрешенных границах значений влияют на выполнение задач по ЦН. Помимо анализа данных по одному аппарату возможны расчеты параметров типовой БА, что позволит увеличить статистическую выборку и повысить точность вычислений.

В целом работа данной подсистемы позволит определить, насколько точно были заданы допустимые диапазоны значений параметров БА КА, подготовить данные для моделей КА и их БА, воссозданных на стендах главных конструкторов, на основании информации, полученной в реальных условиях орбитального полета КА.

На подсистему прогнозирования значений параметров БА возлагается функция по определению их возможных значений на заданный момент времени на основании накопленных

<sup>1</sup> ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

статистических данных со значениями определенных параметров БА. Применение данной системы возможно за счет использования нейронных сетей при условии реализации большой вычислительной мощности и позволяет:

- спрогнозировать данные для БКУ об отклонениях значений параметров БА относительно допустимых, тем самым предотвратить достижение критических нагрузок и запуска протоколов защитных отключений бортовых систем, приводящих к усложнению дальнейшей связи ЦУП с КА;

- повысить автономность функционирования КА путем увеличения периодичности проведения сеансов связи с НКУ.

КСА прогнозирования параметров БА КА в ЦУП отличается большими вычислительными возможностями, может работать с орбитальной группировкой КА и позволяет определить необходимость заблаговременного выхода на связь с КА для принятия необходимых мер по выдаче управляющих воздействий с целью парирования возникновения НШС, если такие меры не были приняты БКУ по результатам работы соответствующего блока на борту.

СОДПП предполагает реализацию возможности принятия решений БКУ для управления БА КА. Необходимость изменения алгоритмов принятия решений в зависимости от полученных результатов блоками прогнозирования и переопределения допустимых диапазонов параметров БА КА определяется в блоке обработки результатов и формирования корректировок в алгоритмах работы БКУ на борту КА на основании предоставленных исходных данных:

- допустимых диапазонов параметров БА КА;
- значений спрогнозированных параметров БА КА на заданный интервал времени.

БКУ на основе полученных сведений вносит корректировки в алгоритмы работы бортового программного обеспечения и руководствуется вновь полученными данными при управлении БА КА, параметры которой анализировались. Отдельными потоками в БКУ анализируется спрогнозированная информация. При необходимости принимаются меры, включая передачу сигнала «Вызов НКУ». Но в целом предполагается, что модель на борту КА будет обеспечивать его работу в автоматическом режиме.

В ЦУП функции данной системы распределены на КСА секторов анализа и управления. Для увеличения вероятности того, что предлагаемые меры, сформированные в виде управляющих воздействий на КА, приведут к желаемому результату, эксплуатирующий состав ЦУП осуществляет оценку последствий реализации операций парирования на основании ЭД, рекомендаций главного конструктора и экспертных знаний.

Совершенствованию работы СОДПП должно способствовать обобщение не только полученных в ходе анализа ТМИ данных, но и по результатам работы определения допустимых диапазонов и прогнозирования параметров БА КА. Их сбор осуществляется в ЦОД, из которого при обращении предоставляются необходимые статистические данные пользователям научно-испытательных и исследовательских подразделений для формирования базы знаний. В последующем выдаются рекомендации для:

- формирования предложений Государственной комиссии в решение Правительства РФ о проведении (завершении) испытаний КС, серийном производстве изделий;
- формирования предложений по созданию и обоснованию облика перспективных КС.

Таким образом, применение СОДПП позволяет представить оперативность при приведении КА к выполнению задач по ЦН (1) как функцию, зависящую от полноты полученных результатов и достаточности принятых мер (2):

$$O = f(Q_{\text{изм}}; D_{\text{реш}}), \quad (2)$$

в которой  $t_{\text{поиск}} \rightarrow \min, t_{\text{упр}} \rightarrow \min$ .

При этом стоит учесть, что прогнозирование позволяет принять заблаговременные меры по предотвращению возникновения НШС и прочих негативных последствий, для которых не будет необходимости в привлечении к огромной работе по восстановлению БА КА всех заинтересованных организаций, участвующих в проведении испытаний. Кроме того, выраженное свойство адаптивности системы позволяет противостоять внешним воздействиям техногенного и природного характера.

Интеллектуализированность системы в представленной модели определяется наличием математической, алгоритмической, программной и инструментальной составляющих интеллектуальной поддержки лиц, принимающих решения при управлении КА [5, 6].

Отдельно необходимо отметить, что СОДПП позволяет хранить сведения, которые будут учитываться при создании перспективных КС с заявленными характеристиками, которые будут не только отвечать современным требованиям к космическим разработкам иностранных государств, но и лидировать в отдельных направлениях.

### **Заключение**

Таким образом, внедрение описанной модели интеллектуализированной системы контроля и диагностирования БА КА на этапе испытаний и применение позволят расширить возможности КА за счет реализации функций корректировки алгоритмов работы бортового и специального программного обеспечения на основании результатов машинного обучения и нейросетевой обработки данных параметров БА, способствующих более достоверному определению ТС БА КА. Полученные результаты накапливаются в ЦОД, который при необходимости может сформировать достаточную статистическую выборку и обеспечить форсированное проведение испытаний в части подтверждения определенных тактико-технических характеристик.

С учетом современных тенденций построения ЦУП на базовых и специализированных комплексах средств автоматизации с возможностью общего использования серверно-коммуникационного оборудования с применением методов, основанных на допусковом контроле, определяемом ЭД, а также жестких решающих правилах оценки ТС БА КА, модель с предлагаемой системой диагностирования позволяет осуществлять интеллектуальный анализ текущих данных, а также хранящихся в общем ЦОД на основе высоконадежных кластеров баз данных.

Реализация предложенной модели позволит повысить оперативность и достоверность принятия решений при испытаниях и применении КА при корректировке диапазонов допустимых параметров БА КА и прогнозировании временных рядов.

### **Список литературы**

1. Иванов И. Г., Морозов С. В., Белокопытов М. Л. Повышение качества испытаний космических средств путем использования системы поддержки принятия решений на основе прецедентов // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2022. № 3. С. 121–130. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15
2. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. *Управление космическими полетами* : учеб. пособие. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. Ч. 2. 434 с.
3. Гуляев М. А., Бондарева М. К., Иванов И. Г., Зубков Г. А. Моделирование использования баз данных о состояниях космических средств для автоматизированной системы управления эксплуатацией и испытаниями космических систем и комплексов // *Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления* : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. М. : ФГБНУ «Аналитический центр». 2021. С. 417–423.
4. Бондарева М. К., Гуляев М. А., Иванов И. Г. Методика выбора параметров бортовой аппаратуры космического аппарата для анализа интеллектуализированными системами // *Проблемы обороноспособности и безопасности* : сб. науч. тр. М. : ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки РФ, 2020. Вып. 22. С. 183–199.
5. Интеллектуализированные и экспертные системы. URL: <http://www.koriolan404.narod.ru/tipis/4.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
6. Воронцов В. А., Федоров Е. А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // *Труды МАИ*. 2015. № 82. С. 10–35.

### **References**

1. Ivanov I.G., Morozov S.V., Belokopytov M.L. Improving the quality of tests of space assets by using a decision support system based on precedents. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(3):121–130. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-15
2. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami: ucheb. posobie = Space flight control : textbook*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2010;(part 2):434. (In Russ.)

3. Gulyaev M.A., Bondareva M.K., Ivanov I.G., Zubkov G.A. Modeling the use of databases on the state of space assets for an automated control system for the operation and testing of space systems and complexes. *Voprosy kontrolya khozyaystvennoy deyatel'nosti i finansovogo audita, natsional'noy bezopasnosti, sistemnogo analiza i upravleniya: materialy VI Vseros. nauch.-prakt. konf. = Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management : materials of the VI All-Russian Scientific.-practical conf.* Moscow: FGBNU «Analiticheskiy tsentr». 2021:417–423. (In Russ.)
4. Bondareva M.K., Gulyaev M.A., Ivanov I.G. Methodology for selecting parameters of onboard spacecraft equipment for analysis by intellectualized systems. *Problemy oboronosposobnosti i bezopasnosti: sb. nauch. tr. = Problems of defense capability and security : collection of scientific works.* Moscow: FGBNU «Analiticheskiy tsentr» Minobrnauki RF, 2020;(22):183–199. (In Russ.)
5. *Intellektualizirovannye i ekspertnye sistemy = Intellectualized and expert systems.* (In Russ.). Available at: <http://www.koriolan404.narod.ru/tipis/4.htm> (accessed 01.12.2022).
6. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. Development of a prototype of an intelligent system for operational monitoring and technical condition of the main onboard systems of the spacecraft. *Trudy MAI = Proceedings of MAI.* 2015;(82):10–35. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Марк Львович Белокопытов**

кандидат технических наук,  
начальник научно-исследовательской лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: hommer1990@mail.ru

##### **Mark L. Belokopytov**

Candidate of technical sciences,  
head of the research laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

##### **Константин Владимирович Ушанев**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник научно-  
исследовательской лаборатории,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: stan\_007@mail.ru

##### **Konstantin V. Ushanev**

Candidate of technical sciences,  
senior researcher of the research laboratory,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaisky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 26.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.12.2022**

**Принята к публикации/Accepted 20.01.2023**

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Р. О. Лавров<sup>1</sup>, Г. И. Афонин<sup>2</sup>, О. А. Ширямов<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1, 2, 3</sup> vka@mil.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Предложена методика, позволяющая оценить трудозатраты и стоимость проведения метрологической экспертизы образцов вооружения и военной техники, аккредитованной научно-исследовательской организацией. *Материалы и методы.* Методика является универсальной для различных отраслей промышленности и основывается на известных методиках расчета трудоемкости, норм времени на разработку научной продукции, проектно-конструкторской, технологической, организационно-технической документации, принятых в научно-исследовательских организациях и предприятиях промышленности. *Результаты и выводы.* Методика предназначена для использования в аккредитованных научно-исследовательских организациях и метрологических службах предприятий промышленности при планировании расходов на проведение метрологической экспертизы, распределения трудовых ресурсов и оценивания эффективности метрологического обеспечения разработки образцов вооружения и военной техники.

**Ключевые слова:** метрологическая экспертиза, трудоемкость, норма времени, вооружение и военная техника

**Для цитирования:** Лавров Р. О., Афонин Г. И., Ширямов О. А. Методика оценивания трудоемкости метрологической экспертизы образцов вооружения и военной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 70–75. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-9

## PROCEDURE FOR EVALUATING LABOUR INTENSITY OF METROLOGICAL EXAMINATION OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

R.O. Lavrov<sup>1</sup>, G.I. Afonin<sup>2</sup>, O.A. Shiryamov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint Petersburg, Russia

<sup>1, 2, 3</sup> vka@mil.ru

**Abstract.** *Background.* The article proposes a methodology that allows assessing the labor costs and cost of conducting a metrological examination of samples of weapons and military equipment by an accredited research organization. *Materials and methods.* The methodology is universal for various industries and is based on known methods for calculating labor intensity, time standards for the development of scientific products, design, technological, organizational and technical documentation adopted in research organizations and industrial enterprises. *Results and conclusions.* The methodology is intended for use in accredited research organizations and metrological services of industrial enterprises when planning expenses for metrological examination, distribution of labor resources and assessing the effectiveness of metrological support for the development of weapons and military equipment.

**Keywords:** metrological examination, labour intensity, time limit, armament and military equipment

**For citation:** Lavrov R.O., Afonin G.I., Shiryamov O.A. Procedure for evaluating labour intensity of metrological examination of weapons and military equipment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):70–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-9

В апреле 2022 г. заместитель председателя Правительства РФ Юрий Борисов доложил Президенту Российской Федерации о том, что новая Государственная программа вооружений будет нацелена на создание качественно новых видов оружия [1]. Несмотря на то, что речь идет о перспективных планах, мы уже в течение нескольких лет являемся свидетелями принятия на вооружение Вооруженных сил Российской Федерации новейших образцов вооружения и военной техники (ВВТ), что является заслугой сотен институтов, конструкторских бюро, проектных организаций и заводов.

Форсированные темпы выполнения разработки, строительства и производства новых кораблей, ракет, самолетов бросают вызов не только предприятиям промышленности, но и ор-

ганизациям, осуществляющим военно-научное сопровождение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР).

Одним из инструментов оценки соответствия результатов НИОКР требованиям, заданным Министерством обороны Российской Федерации, является метрологическая экспертиза (МЭ) образцов ВВТ. Порядок проведения МЭ, ее цели и задачи определяются приказом министра обороны Российской Федерации 2019 г. № 3 и ГОСТ РВ 0008-003-2019.

МЭ проводится аккредитованными научно-исследовательскими организациями и метрологическими службами предприятий промышленности в сроки выполнения этапов опытно-конструкторских работ.

МЭ образцов ВВТ представляет собой сложный процесс, требующий разработки методического аппарата ее проведения, наличия подготовленных метрологов-экспертов, участвующих в работах комиссий по экспертизе. Эффективное проведение МЭ невозможно без тщательного планирования, решения ряда важных организационных вопросов, в том числе и обоснования и формирования состава экспертных комиссий, оценку их трудозатрат и стоимости выполняемых работ.

К сожалению, существующие руководящие документы не устанавливают порядка расчета трудоемкости проведения и нормативов времени на выполнение работ по МЭ, что вызывает существенные затруднения как при определении составов экспертных комиссий, так и при обосновании и определении стоимости проведения метрологической экспертизы.

Вместе с тем в соответствии с п. 13 Положения о военных представительствах Министерства обороны Российской Федерации, утвержденного Постановлением Правительства России от 11.08.1995 № 804, на руководителей организаций возлагаются обеспечение обоснования стоимости военной продукции и согласование ее с военными представительствами, а п. 15 названного положения обязывает руководителей организаций своевременно предъявлять военным представительствам расчетно-калькуляционные материалы, обосновывающие уровень цены на военную продукцию [2].

В условиях отсутствия единых подходов к оцениванию трудоемкости МЭ аккредитованные организации вынуждены самостоятельно разрабатывать стандарты организаций, положения и другие локальные нормативные акты, используя собственный опыт проведения экспертизы [3]. Вместе с тем единая (межведомственная) методика расчета трудоемкости МЭ позволила бы достичь взаимного понимания по ценообразованию между всеми сторонами, участвующими в разработке военной продукции.

Предлагаемая авторами методика основывается на известных методиках расчета трудоемкости, норм времени на разработку научной продукции, проектно-конструкторской, технологической, организационно-технической документации, принятых в научно-исследовательских организациях и предприятиях промышленности. Методика основана на применении норм времени на разработку типовой единицы объема работ, рассчитанной на основе опыта выполнения аналогичных работ авторами.

В общем случае для расчета суммарной стоимости работ по проведению МЭ необходимо использовать формулу

$$C = C_m T_{\Sigma} / 160, \quad (1)$$

где  $C_m$  – средняя ежемесячная заработная плата метролога-эксперта по отрасли (организации), руб.;  $T_{\Sigma}$  – суммарное время, необходимое для проведения МЭ, человеко-часов.

Как правило время, затраченное на работу экспертной комиссии в ходе МЭ, включает в себя следующие виды деятельности, поддающиеся нормированию [4]:

1. Анализ используемой при экспертизе документации, предоставляемой разработчиком образца ВВТ, временные затраты в человеко-часах на выполнение которого составляют

$$T_n = t_a L_n, \quad (2)$$

где  $t_a$  – среднее время на прочтение одного приведенного листа текста, человеко-часов;  $L_n$  – общее количество листов используемой при экспертизе документации, предоставляемой разработчиком образца ВВТ в приведенных листах.

2. Анализ подвергаемой экспертизе документации, временные затраты на который составляют

$$T_3 = k_3 t_a L_3, \quad (3)$$

где  $k_3$  – поправочный коэффициент, отражающий сложность работ на конкретном этапе проведения экспертизы при анализе документации;  $L_n$  – общее количество листов подвергаемой экспертизе документации, в приведенных листах.

3. Разработка программы и заключения МЭ (включая приложения), временные затраты на которую составляют

$$T_p = t_p(L_{np} + k_3L_3), \quad (4)$$

где  $t_p$  – среднее время на разработку одного приведенного листа текста, человеко-часов;  $k_3$  – поправочный коэффициент, отражающий сложность работ на конкретном этапе проведения экспертизы при разработке документации;  $L_u$  – объем разрабатываемой программы МЭ, в приведенных листах;  $L_3$  – объем разрабатываемого заключения МЭ, в приведенных листах.

4. Поиск и анализ необходимой нормативно-технической документации, отраслевых руководящих документов, временные затраты на которые напрямую зависят от объема рассматриваемых экспертом документов:

$$T_n = 0,05t_a(L_n + L_3). \quad (5)$$

Суммарные затраты в человеко-часах с учетом выражений (2)–(5) составят

$$T_{\Sigma} = t_aL_n + k_3t_aL_3 + t_p(L_{np} + k_3L_3) + 0,05t_a(L_n + L_3). \quad (6)$$

Количественным показателем оценивания документации, подвергаемой метрологической экспертизе, является один приведенный лист, соответствующий одной странице формата А4 (размером 297×210 мм), заполненный не менее, чем на 80 %, выполненный шрифтом Times New Roman 14 пт и отпечатанный на принтере или печатной машинке с полуторным межстрочным интервалом [5]. Для оценивания документов, не соответствующих этим требованиям, для приведения к установленной в настоящей методике количественным показателем оценивания документации следует применять поправочные коэффициенты. Значения поправочных коэффициентов представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

Значения поправочных коэффициентов по формату листа

	Текст	Чертеж детали	Сборочный чертеж	Габаритный чертеж	Монтажный чертеж
A0	16	400	800	320	400
A1	8	200	400	160	200
A2	4	100	200	80	100
A3	2	50	100	40	50
A4	1	25	50	20	25
A5	0,5	12,5	25	10	12,5
A6	0,3	6,5	12,5	5	6,5

Таблица 2

Значения поправочных коэффициентов по используемому шрифту

Times New Roman	Arial	Calibri	Tahoma	Рукописный
1	0,8	0,8	0,8	0,7

Если текстовый документ является неоднородным по шрифту, содержит большой объем графического материала (за исключением чертежей), то для расчета принимаются свойства, соответствующие 2/3 документа. Чертежи, выполненные в тексте и в виде приложений, учитываются отдельно.

Таблица 3

Значения поправочных коэффициентов по межстрочному интервалу

Показатель	1,15	1,5	2	3	Рукописный
Поправочный коэффициент	1,25	1	0,75	0,5	0,7

Таблица 4

Значения поправочных коэффициентов по размеру используемого шрифта

Показатель	16	15	14	13	12
Поправочный коэффициент	0,8	0,9	1	1,2	1,5

Среднее время на прочтение одного приведенного листа текста составляет  $t_a = 0,05$  человеко-часа. Среднее время на разработку одного приведенного листа текста составляет  $t_p = 3$  человеко-часа.

Количество листов представляемой разработчиком документации для использования и экспертизы  $L_n$  и  $L_3$  рассчитывается с учетом поправочных коэффициентов, представленных в табл. 1–3 (при необходимости).

Поправочные коэффициенты  $k_2$  и  $k_3$ , отражающие сложность работ по проведению метрологической экспертизы на конкретном этапе разработки вооружения и военной техники, выбираются из табл. 5.

Таблица 5

Значения поправочных коэффициентов, отражающих сложность работ на этапах разработки ВВТ

Коэффициенты	Рассмотрение технического предложения (аванпроекта); разработка (согласование) проекта ТТЗ (ТЗ) на ОКР (СЧ ОКР)	Рассмотрение эскизного (технического) проекта	Разработка РКД для изготовления опытного образца и (или) предварительные испытания опытного образца	Приемочные (государственные, межведомственные) испытания опытного образца	Постановка на производство	Эксплуатация
$k_2$	2,5	2,5	1	1,5	1,5	2,0
$k_3$	2,5	2,5	1	1,5	1,5	2,0

Особую сложность представляют вопросы предварительного определения объема программы и заключения МЭ. Для этого предлагается взять за основу количество решаемых задач МЭ на конкретном этапе.

Объем программы и заключения метрологической экспертизы может быть предварительно оценен лишь примерно и определяется количеством и сложностью решаемых задач (табл. 6).

Таблица 6

Примерный объем программы и заключения МЭ

Показатели	Рассмотрение технического предложения (аванпроекта); разработка (согласование) проекта ТТЗ (ТЗ) на ОКР (СЧ ОКР)	Рассмотрение эскизного (технического) проекта	Разработка РКД для изготовления опытного образца и (или) предварительные испытания опытного образца	Приемочные (государственные, межведомственные) испытания опытного образца	Постановка на производство	Эксплуатация
$L_n$ , листов	11	10	9	13	9	9
$L_3$ , листов	33	30	27	36	27	27

Подстановка полученных результатов в выражение (6) позволяет рассчитать общее время, необходимое для выполнения экспертизы, и определить необходимое количество экспертов.

Таким образом, в условиях отсутствия единого подхода к оцениванию трудоемкости МЭ представленная в статье методика может быть полезна как для метрологических служб

предприятий-разработчиков и производителей образцов ВВТ, так и для аккредитованных организаций. Первым это позволит планировать расходы и стоимость контракта, вторым – рационально распределять людские ресурсы. Методика может быть использована при обосновании штатной численности метрологических служб предприятий промышленности, научно-исследовательских и образовательных организаций. Отдельные элементы приведенной методики могут быть использованы для оценки эффективности работы должностных лиц метрологических служб, организационно-технических мероприятий, направленных на совершенствование метрологического обеспечения разработки и производства образцов ВВТ.

### Список литературы

1. Выступление Заместителя Председателя Правительства Юрия Борисова // KREMLIN.RU: интернет-изд. 2022. 4 апр. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/68135> (дата обращения: 09.09.2022).
2. Об утверждении Порядка определения состава затрат, включаемых в цену продукции, поставляемой в рамках государственного оборонного заказа : приказ Министерства промышленности и торговли России № 334 от 08.02.2019.
3. Швыдун В. В. Актуальные вопросы организации работ по метрологической экспертизе вооружения и военной техники // Военная мысль. 2008. № 2. С. 55–58.
4. Лопатин Ю. В., Щеглов Д. М., Дворов А. Н., Скорянов Н. Н. Особенности проведения в Вооруженных силах Российской Федерации обязательной метрологической экспертизы образцов ВВТ и технической документации на них // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : материалы III Междунар. форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского гос. ун-та аэрокосм. приборостроения, 300-летия Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, 4 марта 2021 г.) / под ред. В. В. Окрепилова. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 227–228.
5. Яковлев Ю. Н., Глушкова Н. Г., Медовикова Н. Я. [и др.]. Метрологическая экспертиза технической документации. М. : Изд-во стандартов, 1992. 184 с.

### References

1. Speech by Deputy Prime Minister Yuri Borisov. *KREMLIN.RU: internet-izd.* = *KREMLIN.RU: online ed.* 2022, 4 Apr. (In Russ.). Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/68135> (accessed 09.09.2022).
2. *Ob utverzhdenii Poryadka opredeleniya sostava zatrat, vkluychaemykh v tsenu produktsii, postavlyaemoy v ramkakh gosudarstvennogo oboronnoho zakaza: prikaz Ministerstva promyshlennosti i trgovli Rossii № 334 ot 08.02.2019* = *On approval of the Procedure for Determining the composition of costs included in the price of products supplied under the state defense order : Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia No. 334 dated 08.02.2019.* (In Russ.)
3. Shvydun V.V. Topical issues of organization of work on metrological examination of weapons and military equipment. *Voennaya mysl' = Military thought.* 2008;(2):55–58. (In Russ.)
4. Lopatin Yu.V., Shcheglov D.M., Dvorov A.N., Skorianov N.N. Features of mandatory metrological examination of samples of military equipment and technical documentation for them in the Armed Forces of the Russian Federation. *Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy: materialy III Mezhdunar. foruma v ramkakh prazdnovaniya 80-letiya Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta aerokosm. priborostroeniya, 300-letiya Rossiyskoy akademii nauk (g. Sankt-Peterburg, 4 marta 2021 g.) = Metrological support of innovative technologies : materials of the III International forum in celebration of the 80th anniversary of the St. Petersburg State University of Aerospace. Instrumentation, 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, March 4, 2021).* Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2021:227–228. (In Russ.)
5. Yakovlev Yu.N., Glushkova N.G., Medovikova N.Ya. et al. *Metrologicheskaya ekspertiza tekhnicheskoy dokumentatsii = Metrological examination of technical documentation.* Moscow: Izd-vo standartov, 1992:184. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Роман Олегович Лавров

кандидат технических наук, доцент,  
заместитель начальника кафедры метрологии,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

#### Roman O. Lavrov

Candidate of technical sciences, associate professor,  
deputy head of the sub-department of metrology,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaysky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Глеб Игоревич Афонин**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры метрологии,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

**Gleb I. Afonin**

Candidate of technical sciences,  
lecturer of the sub-department of metrology,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaysky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Олег Анатольевич Ширямов**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Военно-космическая академия  
имени А. Ф. Можайского  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)  
E-mail: vka@mil.ru

**Oleg A. Shiryamov**

Candidate of technical sciences,  
senior staff scientific,  
Military Space Academy  
named after A.F. Mozhaysky  
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 26.11.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.12.2022**

**Принята к публикации/Accepted 20.01.2023**