

УДК 62.182.8

ОМАРОВ М.А., д.т.н., профессор (ХНУРЭ)
ЦЕХМИСТРО Р.И., к.ф.-м.н., доцент (УкрГУЖТ)

Метод оптимальной комплектации модулятора оптического модуля бесконтактного рельсового дефектоскопа

Предлагается метод и алгоритм расчета оптимальной комплектации конструктивно-функциональных узлов (КФУ) детектора оптического излучения, который является неотъемлемой частью сложного эффективного устройства (на этапе сборки) – бесконтактного детектора контроля состояния железнодорожных рельс. Путем рационального использования комплектующих элементов достигается повышение точности выходного параметра. Рассматриваются примеры случайной и оптимальной комплектации модулятора оптического излучения в целях снижения процесса испытания и отладки.

Ключевые слова: дистанционная дефектоскопия, лазер, интерферометр, дефекты, рельс, световоды, эффект Керра, модулятор, показатель преломления, оптимальная комплектация.

1. Актуальность

Концепция развития Европейской транспортной системы связана с программой "Horizon 2020", которая предусматривает создание интеллектуальных интегрированных транспортных систем (также и железнодорожных). Системы "зеленого интеллектуального и интегрированного транспорта" (Horizon 2020) невозможно построить без эффективных систем безопасности движения нового типа. Современные требования состояния безопасности невозможно удовлетворить без компьютеризированных средств нового типа (интеллектуального).

Существующие концепции и методы контроля состояния железнодорожных рельсов имеют ограниченную применимость. Идентификация дефектов осуществляется оператором, результат имеет низкую производительность контроля и субъективность оценки.

В настоящее время получили распространение внедрение методы бесконтактного контроля железнодорожных рельсов, которые имеют существенные преимущества перед контактными и другими методами диагностики. На железнодорожном транспорте находят применение приборы для бесконтактного контроля состояния железнодорожных рельсов, которые используются в составе специализированных мобильных вагонов-дефектоскопов. В целом такое оборудование позволяет выявлять основные (несложные) дефекты рельсов. В то же время точность идентификации и функциональные возможности существующего оборудования не соответствуют в полной мере растущим требованиям общества.

Существующие методы диагностики состояния железнодорожных рельс не обеспечивают надежной идентификации повреждений и дефектов при увеличении скорости движения вагона-дефектоскопа 70-90 км/ч. Также актуальным является обеспечение надлежащего уровня безопасности движения железнодорожного транспорта при переходе на скоростное движение.

Кроме этого необходимо расширять объем информации про состояние рельс для предоставления ее техническому персоналу, который выполняет работы по техническому обслуживанию и ремонту.

Использование лазерной бесконтактной диагностики не только обеспечивает качество показателей диагностирования при увеличении скорости движения, но и расширение функциональных возможностей [1, 2].

В развитых странах мира большое внимание уделяется исследованию проблем развития функциональных возможностей новых перспективных дефектоскопов бесконтактного типа.

Одним из таких дефектоскопов является устройство с ультразвуковым контролем рельс электромагнитно-акустическим способом (ЭМА).

Преимущества дефектоскопов, построенных на (ЭМА) способе возбуждения и приема ультразвуковых колебаний перед контактными «мокрыми» методами состоят в следующем:

- контроль ведется через воздушный зазор без использования контактной жидкости, отсутствует износ (ЭМА) преобразователей;
- результаты контроля не зависят от наличия на поверхности ледяной корки, пятен масла, пыли и грязи, ржавчины и т.д.;
- продуктивность контроля (погонных метров в секунду (м/с)) может быть практически любой.

2. Постановка задачі

Функциональная схема лазерного дефектоскопа с частотным детектированием сигналов, отраженных от дефектов, изображена на рис. 1 [3]. Это устройство является бесконтактным и по своим характеристикам не уступает (ЭМА) устройству. Функционирование лазерного дефектоскопа сводится к следующим операциям [3, 4]:

- с помощью модулятора 3 импульсы света, генерируемые импульсным лазером 2, преобразуются в меандры и через световоды 4 и фокусирующий элемент 5 облучают контролируемый объект 6, возбуждая в нем ультразвуковые колебания;

- лазером 8 непрерывного излучения через полупрозрачное зеркало 9 и телескоп 10 облучают поверхность контролируемого изделия 6;

- с помощью телескопа 10 принимаются отраженные от контролируемого изделия 6 световые колебания, направляют их на полупрозрачное зеркало 9 и от него через фокусирующий элемент 13 на диафрагмы 14, 15.

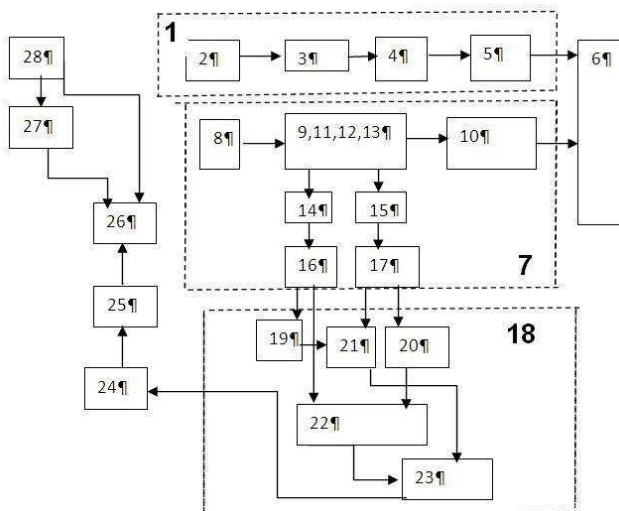


Рис. 1. Функциональная схема дефектоскопа:

1 – блок возбуждения ультразвуковых колебаний, включая импульсный лазер 2; 3 – модулятор светового луча, 4 – световоды; 5 – фокусирующий элемент; 6 – контролируемое изделие; 7 – блок съема информации, который включает в себя лазер 8 непрерывного излучения; 9 – полупрозрачное зеркало; 10 – телескоп; 11 – зеркало; 12 – фазосдвигающий элемент; 13 – фокусирующий элемент; 14, 15 – диафрагмы; 16, 17 – когерентные квадратурные детекторы; 21, 22 – умножители; 23 – элемент вычитания; 24 – узкополосный усилитель; 25 – амплитудный детектор; 26 – индикатор; 27 – датчик местоположения; 28 – синхронизатор.

Далее формируются две сдвинутые на $\pi / 2$ относительно друг друга интерференционные картины, для чего луч лазера 8, направленный на контролируемое изделие 6, частично отраженный от полупрозрачного зеркала 9, направляют на зеркало 11; часть луча, который падает на зеркало 11 и отраженный от него, пропускают через фазосдвигающий элемент 12. При этом сформированы два луча, которые отличаются по фазе на угол $\pi / 2$, проходят через фокусирующий элемент 13, направляются соответственно на диафрагмы 14 и 15.

Колебания, которые прошли сквозь диафрагмы 14 и 15, отраженные от контролируемого изделия 6 и от зеркала 11 с помощью когерентных детекторов 16, 17, когерентно детектируют, выделяя две квадратные составляющие сигнала.

Далее происходит частотное детектирование сигналов, отраженных от объекта 6, в частотном детекторе 18; с этой целью каждый из квадратурных составляющих дифференцируют с помощью дифференциальных устройств 19, 20 и затем выполняют умножения каждой из квадратурных составляющих сигналов в умножающих элементах 21, 22; сигналы со входа перемножителя подают на вычитающий элемент 23; в результате напряжение с выхода частотного детектора является колебанием со средней частотой, равной частоте модуляции лазера 2 с помощью модулятора 3.

Сигналы с выхода частотного детектора 18 фильтруют, усиливают в узкополосном усилителе 24 и детектируют по амплитуде в амплитудном детекторе 25.

Импульсный сигнал с выхода амплитудного детектора 25 подают на индикатор 26, в котором осуществляют обнаружение дефекта при наличии импульсного сигнала, и осуществляют привязку к местоположению дефекта к координатам контролируемого изделия путем представления на индикатор сигналов от датчика местоположения 27.

Затем осуществляют синхронизацию импульса запуска лазера 2, импульсов модулятора 3, датчика местоположения 27 с работой индикатора 26.

Качество работы любого изделия обеспечивается на всех этапах производства: от технического предложения до испытания серийного образца. Важную роль в этом играет технологический процесс сборки как всего изделия (дефектоскопа), так и отдельно взятого КФУ, в нашем случае - модулятором оптического излучения на основе эффекта Керра или с использованием ячеек Поккельса. Например, если взять один модулятор, внутри которого будут использоваться кристаллы (конкретно один или два одновременно), анизотропные свойства которых будут разными, это неизбежно приводит к различным параметрам модулированного оптического излучения.

Это в свою очередь приводит к разным характеристикам модулированного ультразвукового излучения, которое распространяется в металлической рельсе по ходу движения вагона-дефектоскопа и, отражаясь от дефекта, поступает в приемную часть дефектоскопа. Один и тот же дефект (тип дефекта), на которое отреагировало акустическое колебание, модулированное оптическим излучением, может вызвать отраженный сигнал с амплитудными и фазовыми составляющими, изменяющимися в существенном диапазоне [5, 6]. Это будет существенно для такого сложного и прецизионного устройства, как рассматриваемый дефектоскоп. Для устранения разброса параметров необходимо отдельно подбирать по параметрам модулятор (оптические кристаллы), что весьма сложно и в конечном итоге требует результирующего устройства (т.е. самого дефектоскопа). К тому же это усложнит процесс автоматизации работы дефектоскопа, т.е. программно-аппаратный блок управления.

3. Описание алгоритма комплектации

К выходным параметрам КФУ предъявляются вполне определенные требования. Их значения зависят от конкретных параметров входящих в КФУ элементов (деталей), которые в пределах производственного допуска являются случайными величинами. Выбор элементов с такими значениями параметров может привести к недопустимому значению выходного параметра КФУ, превышающему его допуск. Для решения этой проблемы на значения параметров элементов можно наложить дополнительные требования в виде более жесткого допуска [7], из-за чего их значительная доля окажется невостребованной. Существует метод селективной сборки, позволяющий решать эту проблему. Вся номенклатура входящих в КФУ элементов проходит входной контроль, где измеряют их параметры и осуществляют групповой подбор совместимых элементов. При этом поступающие на сборку элементы сортируют по группам параметров (в частности, по размерным группам), и из каждой группы выбирают произвольно [8, 9]. Данный метод позволяет снизить затраты на закупку элементов за счет расширения допусков на их параметры. Благодаря этому метод получил широкое распространение, особенно в машиностроении при сборке двух сопрягаемых деталей. Однако при сборке КФУ, в состав которых входит большее количество элементов, применение традиционной селективной сборки резко усложняется, чем объясняется *актуальность* работы. В качестве примера рассмотрим простейшую функциональную зависимость выходного параметра:

$$Y = f(X_i) = X_1 + X_2 + X_3, \quad (1)$$

где X_i , X_1 , X_2 , X_3 - параметры элементов; i - номер элемента в схеме (электрической, кинематической, гидравлической и т.п.), описывающей работу КФУ (в нашем случае – блок оптического модулятора).

Описание процедуры комплектации приведено на рис. 2.

Сущность оптимальной комплектации оптического модулятора состоит в подборе рабочего кристалла с электрооптическими свойствами, подходящими под требования к техническим параметрам модулятора для конкретного изделия – в данном случае дефектоскопа, например, мощность модулированного излучения, глубина модуляции, индекс модуляции и т.д.

На данные параметры в свою очередь влияют кристаллографические параметры (свойства) - качество обработки граней кристалла, точность ориентации граней относительно оптической оси. Качество обработки граней кристалла и точность их расположения относительно оптической оси (в сравнении с теорией) оказывают существенное влияние на значения показателя преломления n_e, n_o . Допустим, из партии изотропных оптических кристаллов для модулятора подходят те, у которых $n_{\min 0} \leq n_o \leq n_{\max 0}$ и $n_{\min e} \leq n_e \leq n_{\max e}$. Активный оптический элемент с параметрами вне данных неравенств в сборке и настройке модулятора предполагается не использовать. Возможна ситуация, когда кристаллы имеют параметры в пределах данных неравенств, однако результирующий функциональный параметр, имеющий важное значение для определения электрооптических свойств, не удовлетворяет допустимым показателям. Например, рассмотрим коэффициент отражения

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n - n_0)l \quad (2)$$

В этом соотношении λ – длина волны, l – длина модулятора, n_e, n_o – показатели преломления граней кристалла. В соответствии с процедурой на рис. 2 $Y_o = \Gamma_o$. $Y_{\min \text{ доп}} \leq Y_o \leq Y_{\max \text{ доп}}$. Если последнее неравенство не выполняется, то значения n и n_0 переставляются местами, т.е. те строки, где значения $Y_o = \Gamma_o$ выходят за границы максимального и минимально допустимого значения.

Параметры (значения показателей преломления) могут быть распределены по случайному закону. В общем случае они не являются нормальными, что объясняется различными технологическими и физическими факторами. Допустимые значения разброса параметров ΔY разделяются на три группы и, попадая в каждую из них, оптический кристалл попадает в комплект модулятора конкретного типа, т.е.

под конкретный лазер. Между интервалами (операциями комплектации рис. 2) установлены соответствия (указаны стрелками). Различным вариантам анизотропных кристаллов с разными значениями показателя преломления Δn_{oe} соответствуют

разные значения $\Delta Y = \Delta \Gamma$, обеспечивающие требуемое значение электрооптических параметров модулятора каждой из трех групп.

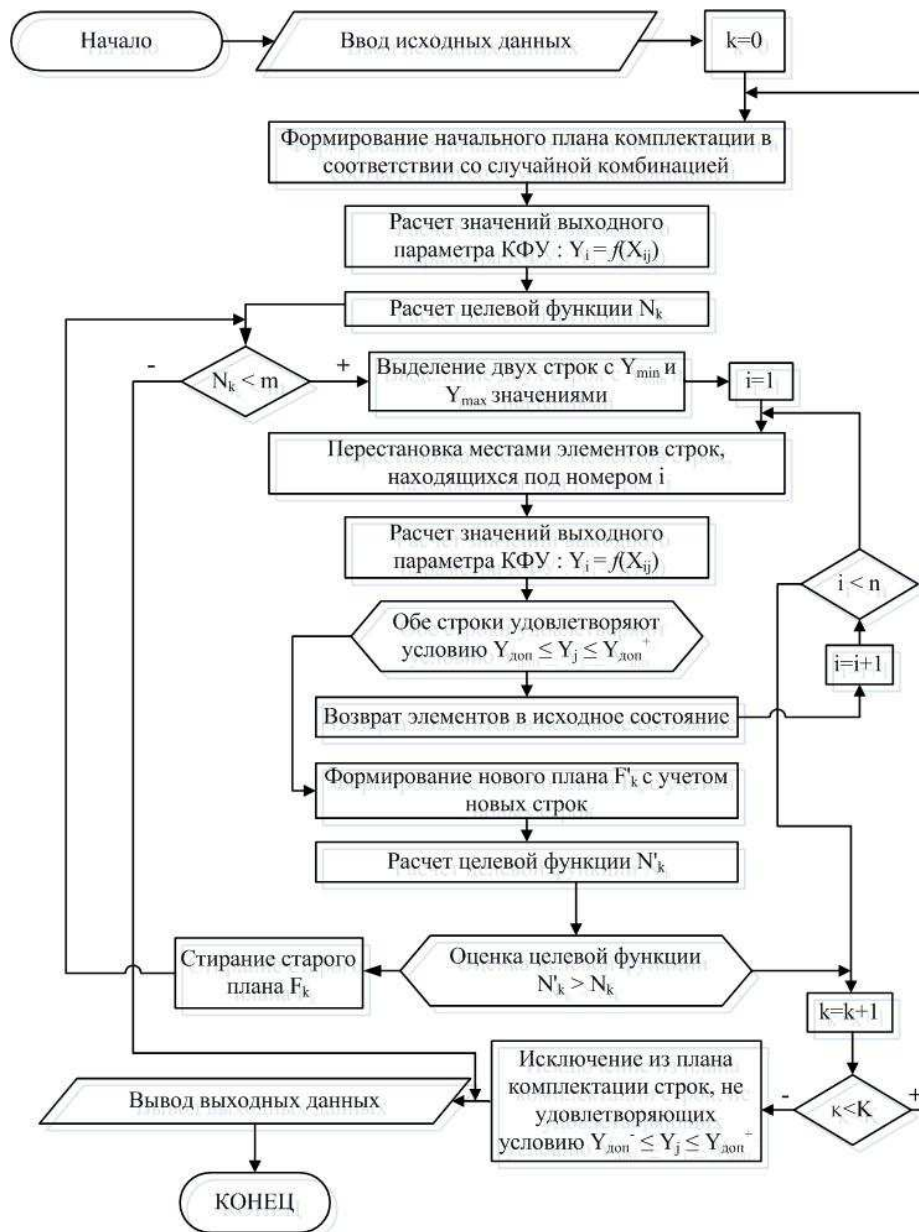


Рис. 2. Блок-схема процедуры оптимальной комплектации

С метрологической точки зрения, они равнозначны. Однако, с экономической стороны, предпочтителен последний вариант, так как обеспечивает максимальное количество скомплектованных модуляторов. В этом случае соответствующие группы разных элементов наиболее близки друг другу по численности.

Рассмотренный пример свидетельствует о том, что с увеличением количества кристаллов с различными электрооптическими параметрами для конструкторско-функционального узла, т.е. модулятора оптического излучения, может вырасти количество групп, стать более чем три.

Увеличение количества кристаллов с разными анизотропными свойствами и групп, на которые их разбивают в зависимости от требуемых электрооптических параметров, может резко усложнить данную задачу. Она становится еще сложнее в тех случаях, когда входящий в КФУ элемент (оптический кристалл) характеризуется не одним, а несколькими параметрами, входящими в расчетную формулу, которая определяет его электрооптические свойства. Так, например кристаллы характеризуются множеством электрооптических параметров: точность ориентации граней относительно главной оптической оси, качество выращенного кристалла, масса и т.д.

Целью исследования является разработка метода комплектации оптического модулятора активным веществом – кристаллом, обладающим анизотропными свойствами с такими характеристиками, которые будут способствовать эффективной модуляции, позволяющим осуществлять сборку КФУ (модулятора) со сложной функциональной зависимостью выходного параметра. В основе метода лежит случайное распределение анизотропных свойств кристаллов, которые используются в оптических модуляторах по КФУ(модулятора) с их последующей целенаправленной перестановкой, при которой осуществляется оптимизация параметров. Целевой функцией могут быть:

- 1) минимальная суммарная погрешность выходного параметра – например показателя преломления n_o, n_k – рабочего материала (анизотропного кристалла), значение параметра Γ ;
- 2) максимальное количество скомплектованных модуляторов с анизотропными кристаллами с показателями преломления на соответствующих гранях $n \leq n_{дон}$.

Для первого случая алгоритм комплектации разработан в [9, 10]. Для второго случая задача формулируется следующим образом: найти план комплектации F модулятора, при котором достигается максимум целевой функции N (выражение 2) и выполняется ограничение

$$N = \sum_{j=1}^m 1 \rightarrow \max \quad (3)$$

где j - номер элемента (кристалла) в технологической таре (номер строки в плане комплектации p см. ниже); m - количество кристаллов (строк);

$$Y_{дон}^- \leq Y_j \leq Y_{дон}^+ \quad (4)$$

здесь $Y_{дон}^-$ и $Y_{дон}^+$ - соответственно верхняя и нижняя границы выходного параметра Y с учетом заданного допуска [11].

Решение поставленной задачи сводится к следующему:

- разработка алгоритма комплектации;
- получение экспериментального подтверждения эффективности метода и алгоритма.

Таблица 1

Порядковый номер кристалла	Значение n_e	Значение n_o	Значение $Y_{max} n_e$	Значение $Y_{min} n_o$	Значение выходного параметра (например, значение разности фаз между модулированными и немодулированными лучами)
1	n_{e1}	n_{o1}	$Y_{max} n_{e1}$	$Y_{min} n_{oN}$	$\Delta\Phi_1$
2	n_{e2}	n_{o2}			$\Delta\Phi_2$
N

План комплектации для целевой функции модулятора по соотношению (2)

Начальный план комплектации представляет собой случайную комбинацию номеров элементов (кристаллов), он представлен на рис. 3. Каждый столбец (элемент $n_o = X_i$ – элемент X_n) состоит из случайного набора номеров, под которыми кристаллы берутся из упаковок (упаковки). В алгоритме приняты следующие обозначения: Y_j – значение выходного параметра КФУ, в нашем случае Γ ; $n_{o,e} = X_{i,j}$ – значение параметра анизотропного кристалла; N – количество кристаллов, которые нужно отобрать для модуляторов указанных трех типов; N_k – суммарное количество модуляторов (КФУ), удовлетворяющее заданной точности (см. выражение (4)), k – количество циклов расчета; F_k – план комплектации, количество и распределение кристаллов с соответствующими значениями показателей преломления, полученные на очередном цикле k .

Общий план комплектации представлен в виде массива в табл. 2, на его основании также можно использовать алгоритм согласно рис. 2.

В качестве примера рассмотрим результаты комплектации оптического модулятора, состоящего из элементов 1 и 2 анизотропных кристаллов с разными оптическими свойствами. Например, выходным параметром модулятора с поперечным полем может являться мощность управления

$$P = \pi \epsilon \epsilon_0 V^2 \Delta v \frac{aD}{L} \left(\frac{\Delta\phi}{\pi} \right)^2 \quad (5)$$

В данном соотношении: V – напряжение, подключенное к модулятору, a – высота прямоугольного кристалла, L – длина кристалла модулятора, D – ширина кристалла, $\Delta\varphi$ – глубина модуляции, $\Delta\nu$ – ширина полосы пропускания.

Таблица 2

Номер конструкторского функционального узла в партии (j)	Номер элемента (анизотропного кристалла) в партии (i)		Значение выходного параметра (значение фазового сдвига) (Y_j) Разность фаз между обычными и необычными лучами после прохождения пути l в модулирующей среде
	Элемент X	Элемент X_n	

В соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 2, в качестве целевой функции выберем выражение 5. Пусть в качестве параметров $X1, X2, X3$ выберем a, D, L . Для простоты описания алгоритма примем остальные параметры как постоянные. Если параметры a, D, L конкретного кристалла близки к максимально или минимально допустимым значениям Y_{min}, Y_{max} , возможна ситуация, когда значение целевой функции выходит за пределы допустимого значения - m . В этом случае кристалл извлекается из плана комплектации данного модулятора и переводится как комплектующий элемент модулятора для оптического модуля с другими параметрами, а на его место берется следующий анизотропный кристалл (происходит перестановка). Этот процесс продолжается до тех пор, пока целевые функции для каждого i -го кристалла будут соответствовать допустимым диапазонам значений (будут формироваться новые планы комплектаций).

На основании алгоритма, представленного на рис. 2, разработана компьютерная программа, которая позволяет строить гистограммы распределения сдвига фаз между модулированным и немодулированным оптическим излучением, а также мощность управления.

Гистограммы законов распределения разности фаз модулированного и немодулированного излучения будут отличаться соответственно при случайной и оптимальной комплектации анизотропными кристаллами с разными свойствами.

Сравнивая гистограммы, приходим к выводу, что среднеквадратическое отклонение уменьшилось примерно в 2 раза.

4. Заключение

Практическая значимость предложенного метода комплектации модулятора оптического модуля дефектоскопа состоит в экономии людских и материальных (аппаратных ресурсов).

Научная новизна состоит в упрощенной селекции элементов (анизотропных кристаллов), например, с различным качеством обработки поверхностей и геометрическими размерами, что приводит к разным значениям показателя преломления, что в свою очередь меняет параметры качества модуляции оптического излучения. Данные зависимости

сказываются на работе более сложного устройства – дефектоскопа, узлы которого отличаются сложной функциональной зависимостью выходного параметра. При этом на некоторые выходные параметры могут оказывать влияние (включать в себя) одновременно несколько параметров входящих элементов.

Предложенный метод может быть реализован с помощью программного и экспериментального способов. Первый способ является перспективным с точки зрения производительности, однако требует высокоточной математической модели функционального устройства и абсолютного входного контроля элементов. Второй способ требует наличия специального тестирующего оборудования, в котором будут монтироваться элементы на время эксперимента. После этого элементы должны извлекаться из измерительного стенда и подаваться на окончательную сборку, в нашем случае – на оптический модуль дефектоскопа.

Список литературы

1. Бондаренко, А. Н. Лазерные методы возбуждения и регистрации акустических сигналов [Текст] / А.Н. Бондаренко. – М.: Изд.стандартов, 1983. – 116 с.
2. Скоков, И. Б. Оптические интерферометры [Текст] / И.Б. Скоков. – М.: Машиностроение, 1978. – 128с.
3. А.с. № 509825 СССР. Ультразвуковой дефектоскоп / Сафронов Г. С., Новиков А.А. Чеботарев В.И. 1975.
4. Шрайбер, Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия [Текст] / Д.С. Шрайбер. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
5. Omarov M. A. Tsekhmistro R.I. Dispersional Restriction of the Transmission Link Length in Quantum Cryptographic Telecommunication Systems with Polarization Encoding / Telecommunication and Radio Engeneering 68(20),(2009) / p.1841-1848.
6. Омаров, М.А. Сучасні волоконно-оптичні системи передавання [Текст]: навч. посібник / М.А. Омаров, Р.І. Цехмістро, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2009. – 216 с.
7. Фомин, А. В. Допуски и посадки в РЭА [Текст] / А.В. Фомин. – М.: Сов. радио, 1973. – 128 с.

8. Буловский, П. И. Автоматизация селективной сборки приборов [Текст] / П.И. Буловский. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
9. Мамонтов, А. В. Оптимальная комплектация конструктивно-функциональных узлов электрорадиоэлементами [Текст] / А.В. Мамонтов // Радиотехника. – 2001. – Вып. 117. – С. 125-126.
10. Левит, М. Е. Балансировка деталей и узлов [Текст] / М.Е. Левит. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
11. Кайман, М. М. Электрические машины [Текст] / М.М. Кайман. – М.: Высш. школа, 1983. – 432 с.

Омаров М.А., Цехмістро Р.І. Метод оптимальної комплектації модулятора оптичного модуля безконтактного рейкового дефектоскопа. У статті наведено опис безконтактного рейкового дефектоскопа з використанням модульованого оптичного випромінювання. Описано алгоритм оптимальної комплектації модулятора оптичного випромінювання на основі ефекту Керра, тобто підбору анізотропного кристалу з відповідними фізичними властивостями. Показана ефективність зазначеного алгоритму, що знижує людські і апаратні пристрої для налагоджування дефектоскопа.

Ключові слова: дистанційна дефектоскопія, лазер, інтерферометр, дефекти рельс, світловоди, ефект Керра, модулятор, показник заломлення, оптимальна комплектація.

Omarov M.A., Tsekhmistro R.I. Optimum configuration method for optical module modulator of noncontact rail flaw detector. The article describes a noncontact rail flaw detector with the modulated optical radiation. Specified is the algorithm of the optimum configuration for the optical radiation modulator based on the Kerr effect, that is, the proper selection of an anisotropic crystal with appropriate physical properties. The article shows the efficiency of the above-mentioned algorithm, which reduces human and hardware resources for adjusting the rail flaw detector.

The scientific newness consists in a simplified selection of elements (anisotropic crystals) with the different quality of the surface treatment, which leads to different values of the refractive index, and in turn changes the modulation quality parameters of the optical radiation affecting the operation of a more complex device - flaw detector.

The proposed method can be implemented using software and experimental methods. The first method is promising in terms of productivity, however, it requires a high-precision mathematical model for the functional device and the absolute input control of the elements. The second method requires special test equipment where the

elements will be mounted during an experiment. After that, the elements will be retrieved from the measuring bench and transferred for the final assembly on the optical module of a flaw detector in our case.

Key words: remote flaw detection, laser, interferometer, rail defects, optical fiber, Kerr effect, modulator, refractive index, optimum configuration

Рецензент д.т.н., професор кафедри технології і автоматизації виробництва радіоелектронних і електронно-вычислительных средств
Цымбал А.М. (ХНУРЭ)

Поступила 03.10.2016 г

Омаров Мюрад Анверович, д.т.н., профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой естественных наук факультета подготовки иностранных граждан.

Цехмістро Р. І., к.физ-мат.н. доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Харьковский государственный университет железнодорожного транспорта.

Omarov M.A., Dr. of Tech. Sc., Professor. Kharkov National University of Radio Electronics.

Tsekhmistro R.I., PhD. Departments computers systems. Ukrainian State University of Railway Transport.