УДК 537.872

Юрій Лаврич, к.т.н.

(старший научный сотрудник, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, г. Днепр)

Сергей Плаксин, д.ф.-м.н.

(заведующий отделом, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, г. Днепр)

Любовь Погорелая

(младший научный сотрудник, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины, г. Днепр)

МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Предложен способ пассивной локализации и регистрации электромагнитных излучений, возникающих в процессе нарушения сплошности путевой структуры магнитолевитационного (Маглев) транспорта, который с учетом некоторых особенностей этого транспорта обеспечивает создание системы динамического контроля конструктивной прочности путевой структуры в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: *путевая структура, трещина, прочность, динамический контроль, электромагнитные излучения.*

Вступление. Как показывает имеющийся опыт развития техносферы, отказы, аварии и катастрофы всегда были неотъемлемой частью жизненного цикла всех без исключения технических систем, несмотря на бытующее мнение, что аварии являются маловероятными событиями, наступления которых можно избежать [1]. При прогнозировании и управлении опасными событиями главное внимание необходимо обращать на опасные ситуации с относительно малыми частотами проявления. В соответствии с концептуальным положением теории безопасности (первая аксиома безопасности) [2,3] нет и не может быть абсолютной безопасности, то есть опасность никогда не равна нулю, а безопасность никогда не равна единице.

Магнитолевитационная (Маглев) транспортная система относится к сложным многофункциональным системам, контроль безопасности функционирования которых связан со многими составляющими системами.

Украина владеет технологиями построения магнитолевитационных транспортных систем – разработанный Институтом транспортных систем и технологий НАН Украины действующий макет магнитолевитационного транспорта приведен на рис.1.

DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-1-5

Рис. 1. Общий вид действующего макета магнитолевитационного транспорта

В отличие от классического транспорта на принципе «колесо–рельс» Маглев использует технологию магнитной левитации, когда транспортное средство в процессе движения не касается путевого полотна. Высокие скорости движения (> 500 км/ч) и малые зазоры левитации (~ 10 мм) создают дополнительные сложности в обеспечении надежности и безопасности его функционирования, а также при построении системы контроля эксплуатационной надежности, поскольку использование традиционных средств контроля становится невозможным. Путевая структура (ПС) также представляет собой сложную систему, состоящую из ряда электронных и электротехнических устройств и изделий, обеспечивающих требуемые параметры левитации, движения, контроля и управления. ПС Маглев транспортного средства, выполненная как из бетонных, так и алюминиевых материалов высокой чистоты, является активной, так как реализация магнитолевитационного эффекта достигается применением тянущих секций линейного двигателя, состоящего из отдельных катушек, размещенных в ПС. При этом на катушку с током, расположенную в ПС, действуют пондеромоторные силы, сжимающие ее вдоль оси и растягивающие в радиальном направлении, что сказывается на механической прочности как самой катушки, так и ПС.

Высокая сложность составных частей рассматриваемого транспортного средства с разнообразными функциональными характеристиками и различной степенью их влияния на надежность функционирования системы в целом требует выбора некоего обобщенного информационного параметра контроля, оказывающего наибольшее влияние, влекущего наиболее опасные последствия с точки зрения безопасности Маглев транспортного средства в целом, то есть параметра, интегрировано характеризующего состояние и безопасность объекта контроля. Выбор такого интегрированного объекта контроля представляет собой важный этап при построении системы контроля.

Исходя из особенностей ПС и ее определяющей роли в поддержании надежности функционирования высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ),

имеет смысл в качестве такого обобщенного интегрированного параметра контроля использовать конструктивную прочность ПС и на этой основе разработать метод динамического контроля конструктивной прочности ПС, учитывающий время-скоростные характеристики процесса ее деградации. Метод позволит оценивать не статически-имитируемое состояние, а реально динамично изменяющееся состояние объекта контроля в реальном времени и в отсутствие контакта с ним и с учетом особенностей характеристик ПС может быть аппаратно реализован на основе автоматизированных систем контроля.

Несмотря на сложность механики разрушения, принципиальная возможность решения связанных с этим проблем вытекает из кинетического подхода к разрушению твердых тел согласно которому разрушение начинается практически с момента приложения к телу любой нагрузки и заключается в образовании и развитии микроскопических трещин и пор. Этот процесс «микроразрушения» и готовит переход к макроразрыву.

Практически во всех материалах, в том числе и примененных в путевой структуре (ПС) Маглев транспортного средства, имеется определенная неоднородность – присущая изначально или приобретенная в процессе эксплуатации (деформирования). В неоднородных материалах внутреннее строение, взаимодействие микрочастиц и крупных составляющих элементов непостоянно как по объему, так и во времени. Их структура может содержать микро- и макропоры, трещины – как сухие, так и заполненные водой. Все деструктивные процессы, протекающие в конструктивных материалах, являются длительными и вялотекущими до определенного критического периода. Практически все конструктивные материалы в исходном состоянии уже содержат микротрещины, являющиеся результатом пластических деформаций, и хотя большинство из них не является разрушающе-опасными, однако именно они предшествуют процессу разрушения.

Проведение непрерывного мониторинга или обычного периодического контроля состояния конструктивных систем и материалов (если не произошло форс-мажорных событий или не появились требования к изменению системы эксплуатации), достаточно сложно или даже практически невозможно, в то время как задача оптимальной эксплуатации транспортной инфраструктуры становится все более актуальной. Отсутствие необходимой информации о параметрах износа конструкций обуславливает директивное назначение времени проведения ремонтных мероприятий, что приводит к преждевременному ремонту одних конструкций и повышенному уровню рисков возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации других. Таким образом, степень безопасности функционирования транспортного средства в целом и его составляющих систем на различных конструктивно-иерархических уровнях является декларированной и не подтвержденной результатами текущего контроля.

Анализ последних достижений и постановка задачи. Несмотря на существование множества методов исследования процесса разрушения, все они, как правило, связаны с необходимостью временных и финансовых затрат, с прекращением применения объекта по назначению, а некоторые даже небезопасны для персонала. Среди физических явлений, пригодных и перспективных для решения задачи динамического контроля конструктивной прочности элементов и процессов их разрушения, наиболее подходящим представляется явление механоэлектрического преобразования, имеющее

две составляющие компоненты – электромагнитную и акустическую. Генерация электромагнитных излучений (ЭМИ) при этом явлении является следствием неоднородности и локальной неравномерности пластических течений материалов и взрывообразного зарождения микротрещин.

Образование трещин сопровождается возникновением на ее краях поверхностных и объемных зарядов, движение которых вызывает появление электромагнитного излучения [4,5]. Во всех случаях эмиссионные события, возникающие вследствие деструкции прочности конструкции при умеренных нагрузках, когда макроразрушение маловероятно, отражают процесс «аккомодации» неоднородного материала к данной нагрузке. С позиций того, что до некоторого предела среда может приспосабливаться к действующему напряжению, вследствие чего невозможно визуально заметить начало изменения конструкционной прочности состояния, необходим непрерывный мониторинг изменения характеристик объекта контроля в режиме реальной эксплуатации. ЭМИ, возникающие в процессе нарушения сплошности материалов, в перспективе могут стать приемлемым технологическим средством для построения системы динамического контроля конструктивной прочности элементов конструкции ПС ВСНТ.

Цель и задача исследования. Целью данного исследования является установление признака начала формирования и развития микроразрушения материалов и разработка на этой основе метода и средства динамического контроля разрушения путевой структуры, определяющей безопасность ВСНТ в целом. Суть работы заключается в установлении возможности применения закономерностей импульсного электромагнитного излучения материалов на различных этапах нагружения для контроля процесса разрушения.

Материалы и методы исследования. Регистрируемые ЭМИ, связанные с кинетикой процесса разрушения, характеризуются различными значениями амплитуды и интенсивности сигнала, разной формой импульсов и частотой сигналов электромагнитной эмиссии. Поэтому создание способа селекции и регистрации электромагнитных сигналов, возникающих в процессе разрушения ПС, является необходимым для создания устройства динамического контроля конструктивной прочности элементов ПС в реальном масштабе времени.

Среди значительного количества математических моделей, которыми оперирует современная механика разрушения твердых тел, наибольшее признание получила теория трещин, а среди параметров, характеризующих прочность материалов, все более важным в последнее время является трещиностойкость [6]. Процесс разрушения, представляющий собой совокупность явлений, начинается гораздо раньше проявления первых визуально заметных его признаков. Имеющиеся в используемых в ПС материалах дефекты структуры со временем могут превратиться в трещины, которые, если они не будут вовремя обнаружены, могут привести к катастрофическим последствиям. Процесс трещинообразования не всегда приводит к разрушению тела в понимании потери сплошности и полного распада на отдельные, т.е. трещины могут и не пересекаться, однако, трещинообразование всегда является причиной разупрочнения и предтечей разрушения.

При перераспределении напряжений в неоднородном материале происходит непрерывное преобразование механической энергии в электрическую, ее накопление с образованием сильного локального электрического поля, сосредоточенного в устье движущейся трещины, и последующее выделение в виде ЭМИ [7]. В результате

элементарного акта разрушения – образования микротрещины – возникает импульсный сигнал, длительность и форма которого определяются механизмом релаксации заряда и характером движения поверхности при распространении трещины. Количество возникающих импульсов ЭМИ определяется числом вновь образовавшихся микротрещин. Механическое нагружение материалов сопровождается их деформированием и разрушением с образованием и развитием трещин различного масштаба от микротрещин до магистрального разрыва. При этом возникает акустическая эмиссия (АЭ) и электромагнитная эмиссия (ЭМЭ). АЭ развивается с нарастанием интенсивности и достигает своего максимального значения к моменту макроразрушения. В материалах между параметрами ЭМЭ и АЭ существует определенная связь [8,9], обусловленная характером механоэлектрических преобразований в них. При деформировании материалов задолго до начала трещинообразования происходит движение имеющихся и вновь образованных дислокаций, которые вместе с заряженными точечными дефектами, окружающими их, участвуют в образовании двойных электрических слоев.

ЭМЭ возникает уже на первых стадиях нагружения, соответствующих единицам и первым десяткам процентов от разрушающих напряжений, и сопровождает весь процесс трещинообразования. В статически нагружаемом объекте акустические волны от растущих трещин приводят в действие механизм колебаний величины дипольного момента двойных электрических слоев вследствие изменения расстояния между зарядами разного знака, в результате чего происходит эмиссия электромагнитных сигналов. Процесс накопления импульсов ЭМИ на этой стадии относится к классу персистентных (самоподдерживающихся) процессов.

В системах распознавания образов, принятия решений, прогнозирования и классификации важное значение имеет описание объекта на основе набора (системы) признаков, обладающего максимальной информативностью. Использование неинформативных и избыточных признаков не только оказывается бесполезным, но и снижает эффективность процесса распознавания [10]. С практической точки зрения очевидным является желание, чтобы число признаков распознавания в априорном словаре было минимально возможным – в этом случае создаваемая система контроля окажется наиболее простой как для реализации, так и для последующей эксплуатации. Так как граница минимальности отсутствует, то можно предположить, что принципиально возможно построение системы на основе одного признака, если он обладает достаточной различительной способностью [11]. Немаловажным является условие, чтобы этот единственный признак был доступен для определения и по физическим и по экономическим соображениям.

Как известно, все типы связей между атомами обусловлены силами электромагнитной природы [12]. Несмотря на различные существующие гипотезы возникновения ЭМИ при разрушении, все их объединяет тот факт, что твердые тела при деформации излучают электромагнитные волны, порождаемые процессами трещинообразования [13]. Потеря сплошности и изменение прочности материалов сопровождается возникновением электромагнитных полей на поверхности повреждения, подчиняющихся общепринятой системе волновых уравнений. Распространяющаяся с большой скоростью трещина несет в своей вершине заряд, равный 10^{-10} - 10^{-11} Кл/м (на единицу длины фронта трещины), и дипольный момент, измеряемый величиной 10^{-13} - 10^{-14} Кл·м. Вследствие разделения зарядов диполя противоположного знака на берегах трещины возникает поверхностный заряд с

плотностью $\delta_0 \sim 10^{-3}-10^{-4}$ Кл/м². При этом микротрещина с размерами $10^{-4}-10^{-3}$ м несет на себе дипольный момент $\sim 10^{-14}-10^{-16}$ Кл·м. При регистрации импульса радиоизлучения трещины в ближней зоне его форма будет определяться ростом дипольного момента или заряда в процессе движения трещины и релаксацией зарядов после ее остановки. Дипольный момент трещины радиуса $a(t)$ с учетом релаксации заряда в процессе ее распространения может быть вычислен следующим образом:

$$P(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^a 2u(r) \delta_0 e^{-(a-r)/v\tau_p} r dr d\Theta,$$

где $u(r)$ – смещение берегов трещины; v – скорость движения берегов трещины; τ_p – время релаксации зарядов на берегах трещины; r, Θ – цилиндрические координаты.

Дипольный момент после вычисления интегралов можно представить в виде

$$P(t) = \frac{4\pi(1-v)\sigma\delta_0(v\tau_p)^3}{G} \left[(a-1) + (a+1)e^{-\bar{a}} \right],$$

где $\bar{a}(t) = a(t)/v\tau_p$ – приведенный радиус трещины; G – модуль сдвига; σ – критическое напряжение, до которого трещина распространяется.

Для малых ($a \ll 1$) и больших ($a \gg 1$) радиусов трещин дипольные моменты соответственно равны

$$P(t) = \frac{2\pi(1-v)\sigma\delta_0 a^3}{G}; \quad P(t) = 2 \frac{2\pi(1-v)\sigma\delta_0 a}{G} (v\sigma\tau_p)^2.$$

Потенциал поля, создаваемого диполем и зарядом Q в вершине трещины, в ближней зоне излучения определяется как [14]

$$\phi = \frac{P}{4\pi\epsilon'R^2} \approx \frac{\delta_0 a^3}{\epsilon'R^2} \sqrt{\frac{0,2a_p}{\pi a_0}},$$

где R – расстояние от диполя до точки регистрации потенциала; a_p – постоянная кристаллической решетки; a_0 – стартовый размер трещины; ϵ' – комплексная диэлектрическая проницаемость материала.

Отношение величин потенциала поля диполя (ϕ_p) и потенциала поля заряда трещин (ϕ_Q) в ближней зоне ($a \ll 1$) может быть оценено согласно формуле

$$\frac{\phi_p}{\phi_Q} = \frac{2\delta_0 a^2}{QR} \sqrt{\frac{0,2a_p}{\pi a_0}}.$$

Для типичных значений $\delta_0 = 10^{-3} - 10^{-4}$ Кл/м², $Q \approx 10^{-11}$ Кл/м, $a_0 \sim 10^4$ м, $a_p \sim 10^{-10}$ м, $\nu\tau_p \sim 10^{-2}$ м в ближней зоне излучения ЭМИ малых трещин имеет радиус зоны приема $R \approx 10^{-1} - 10^{-3}$ м, что дает $\phi_p/\phi_Q = 10 - 10^3$, то есть поле диполя отдельной трещины на один-три порядка превышает поле ее заряда. В дальней волновой зоне ЭМИ больших трещин имеет радиус зоны приема $R \approx 10 - 10^2$ м и вследствие экспоненциального закона его затухания практически отсутствует. Поэтому спектры ЭМИ трещин в ближней зоне при фиксированном расстоянии левитации ВСНТ можно рассматривать в качестве информационного сигнала процесса разрушения, когда каждой стадии разрушения соответствует свой спектр излучения (рис. 2). Для начала процесса разрушения характерно появление в спектре ЭМИ более высоких частот, связанных с образованием микротрещин. По мере формирования трещин, накопления и ветвления их происходит процесс перемещения спектра ЭМИ в область более низких частот.

Рис. 2. Качественная характеристика процесса разрушения

Важной задачей при проектировании устройства динамического контроля является точное определение координат источников информационных признаков – сигналов излучения ЭМЭ и АЭ. Вследствие размещения устройства контроля на транспортном средстве текущие координаты источников излучения ЭМЭ и АЭ на ПС привязаны к координатам транспортного средства в момент обнаружения информационного признака. Текущие параметры движения транспортного средства определяются и фиксируются бортовым позиционером, информация из которого затем записывается на носитель или, при наличии соответствующей инфраструктуры, передается в режиме реального времени по радиоканалу, накапливается на информационном сервере диспетчера. Концепция построения устройства динамического контроля прочности (УДКП) путевой структуры на основе механизмов возникновения ЭМЭ и АЭ может быть реализована путем пассивной радиолокации, так как физические поля ЭМЭ и АЭ излучаются самими дефектами контролируемой ПС. Структурная схема УДКП приведена на рис. 3. Сигналы ЭМЭ и АЭ, излучаемые ПС транспортного средства, принимаются приемными антеннами АУЭ и АУА соответствующих ЭМЭ и АЭ каналов. Основной задачей канала фиксации ЭМЭ является обнаружение начала процесса

трещинообразования и динамики перемещения, а канала фиксации АЭ – определение скорости процесса и потери сплошности.

Рис. 3. Структурная схема УДКП

Применение двух каналов обусловлено трудностью выделения сигналов АЭ из помех. Это объясняется тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, поскольку АЭ представляет собой стохастический импульсный процесс. При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и темп их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения источника АЭ.

Для обеспечения неискаженной передачи по тракту принятые антенными устройствами АУЭ и АУА электромагнитные и акустические сигналы предварительно усиливаются в усилителях УЭС и УАС каждого из каналов и фильтруются фильтрами Ф. Сигналы после фильтров усиливаются усилителями УЭК и УАК соответствующих каналов, а отфильтрованные аналоговые сигналы поступают на входы аналоговых цифровых преобразователей для оцифровки аналого-цифровыми преобразователями АЦП соответствующих каналов. Элементы устройства динамического контроля после выходов АЦП реализуются в цифровой форме.

Совместная регистрация ЭМЭ и АЭ дает возможность лоцировать местоположение источников эмиссии по разнице времен прихода этих сигналов в соответствующие каналы.

Цифровые сигналы соответствующих каналов поступают на схемы счета сигналов ЭМЭ – СИЭ и сигналов АЭ – СИА. Результат счета формируется счетчиком в заданном коде и может храниться требуемое время. В моменты возникновения излучений вследствие трещинообразования запускается генератор счетных импульсов счетчика, и счетные импульсы начинают поступать на суммирующий счетчик. Код в суммирующем счетчике начинает возрастать, и в момент прекращения излучения трещиной счетчик импульсов останавливается и отображает число импульсов. Результаты счета поступают в память микропроцессорного устройства МПУ и счетчик импульсов обнуляется.

В памяти МПУ хранятся эталонные кинетические кривые накопления числа импульсов для путевой структуры транспортного средства, эталонные уровни

дипольных моментов, соответствующие путевой структуре на всей ее протяженности, используемые для калибровки приемного тракта.

Устройство анализа и обработки (УАО) предназначено для построения на основе результатов динамического контроля S-образной кривой (рис. 2) и сравнения ее с эталонной.

Сигнал электромагнитной эмиссии пропорционален смещению источника эмиссии, в то время как сигналы акустической эмиссии пропорциональны ускорению, что обеспечивает равную чувствительность к микромеханическим процессам, протекающим с различными скоростями. Для накопления информации о состоянии ПС система УДКП содержит устройство обработки и передачи (УОП) текущей информации, полученной за время прохождения данного транспортного средства. Текущая информация о состоянии ПС беспроводными средствами передается не только диспетчеру, но и очередному (следующему) транспортному средству, двигающемуся по ПС, что позволяет проведение текущего сравнительного анализа в режиме реального времени как диспетчером, так и экипажем последующих транспортных средств. Наличие у диспетчера сообщений как от первого, так и от последующих транспортных средств (ТС), позволяет оценить изменение состояния путевой структуры в интервале их движения и тем самым проанализировать динамику, оценить степень опасности и принять управленческое решение. Устройство синхронизации (УСС) предназначено для обеспечения привязки текущих координат источников излучения на ПС к текущим координатам местоположения ТС. Сигналы синхронизации с устройства позиционирования транспортного средства (ПТС), поступающие через устройство УСС, управляют функционированием обоих каналов и, соответственно, устройств УАО и УОП. Координаты мест нахождения источников излучений регистрируются в памяти МПУ в базе данных текущих координат.

Обеспечение электромагнитной совместимости устройства УДКП может быть реализовано путем применения защитных электромагнитных экранов, имеющих самые различные конструкции [15,16].

Выводы. Таким образом, существующие зависимости между параметрами электромагнитного излучения, возникающего при трещинообразовании материалов ПС, и прочностным состоянием ПС позволяют реализовать устройство пассивного неразрушающего динамического контроля путевой структуры ВСНТ, которое характеризуется высокой информативностью и быстродействием и обеспечивает высокую надежность и безопасность функционирования современных высокоскоростных транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мещанинов С.К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок. Моногр. Днепр: Национальный горный университет, 2011. 360 с.
2. Откидач В.В., Джура С. Г., Чурсинова А. А. Концептуальные основы системного анализа рисков в энергетике // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы. Донецк, 2007. Т. 2. С. 279-298.
3. Клебанов Ф.С. О современной концепции безопасности // Безопасность труда в промышленности, 2002. № 6. С. 33– 38.
4. Голуб В.П., Плащинская А.В. Феноменологическая модель роста усталостной трещины в идеально-пластических бесконечных пластинках при одноосном симметричном знакопеременном нагружении // Прикладная механика, 2005. Т. 41 (51), №12. С.116-127.

5. Плащинская А.В., Башта Е.Т., Джурик Е.В. Моделирование распространения усталостной трещины с учетом двухосного напряженного состояния у ее вершины // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування, 2015. № 2 (74). С. 36-41.
6. Пирадов К.А., Ротт Н.А. Трещиностойкость бетонов на легких заполнителях // Строительство, материаловедение, машиностроение. Стародубовские чтения, 2014. С.160-163.
7. Вострецов А. Г., Яковичская Г. Е. Влияние внешнего импульсного низкоэнергетического воздействия на процесс разрушения предварительно нагруженных образцов горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Геомеханика, 2014. № 6. С. 61-69.
8. Черникова Т.М., Иванов В.В., Михайлова Е.А. Спектральный анализ электромагнитного излучения при нагружении материалов // Сб. научн. трудов Межд. научно-практической конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте`2007». Одесса: Черноморье, 2007. Т.1. С. 86–87.
9. Гордиенко Ю.Е., Щербань И.Н. СВЧ резонаторный сенсор для диагностики малоразмерных объектов различной консистенции // Материалы 7-й МНПК «Сенсорная электроника и микросистемные технологии». Одесса, 2016. С.43.
10. Субботин С.А., Олейник А.А. Выделение набора информативных признаков на основе эволюционного поиска с кластеризацией // Искусственный интеллект, 2008. №. 4. С. 704-711.
11. Субботин С.А., Олейник А.А. Анализ и обработка априорной информации в конструировании систем автоматического распознавания. Дніпро: Наука і освіта, 2007. 180 с.
12. Колесник Д.Ю., Коваль П.Н., Сыченко В.Г. Проникающие ингибиторы металлокоррозии для повышения долговечности железобетонных конструкций // Материалы 67 МНПК «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2007. С.110.
13. Дубинчик О.И. Влияние коррозии бетона и арматуры на долговечность пролетных строений мостов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2005. Вип. 6. С. 109-112.
14. Черникова Т.М. Научные основы метода контроля процесса разрушения композитов с использованием электромагнитного излучения. Кемерово. диссер. д. т. н., 2014. 319 с.
15. Патент № 82919 України. Матричний електромагнітний екран / В.О. Дзензерський, І.І. Соколовський, Ю.М. Лаврич та інш., 2013. Бюл. № 16 від 27.08.13.
16. Патент № 87810 України. Фрактальний електромагнітний екран-реструктуризатор / В.О. Дзензерський, І.І. Соколовський, Ю.М. Лаврич та інш. – 2014. – Бюл. № 4 від 25.02.14.

REFERENCES

1. Meshchaninov, S.K. (2011). *Metody modelirovaniya i upravleniya nadezhnost'ju funkcionirovaniya gornyh vyrabotok* [Methods of modeling and management of the reliability of mining]. Dnipro, National Mining University.
2. Otkidach V.V., Dzhura S. G., Chursinova A. A. (2007) *Konceptual'nye osnovy sistemnogo analiza riskov v jenergetike* [Conceptual foundations of system analysis of risks in the energy sector]. *Praktika i perspektivy razvitija partnerstva v sfere vysshej shkoly* [Practice and prospects for the development of partnership in the field of higher education]. Doneck, V. 2, 279-298.
3. Klebanov, F.S. (2002). *O sovremennoj koncepcii bezopasnosti* [On the modern concept of security]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Industrial Safety], 6, 33–38.
4. Golub, V.P., Plashchinskaya, A.V. (2005). *Fenomenologicheskaja model' rosta ustalostnoj treshhiny v ideal'no-plasticheskikh beskonechnyh plastinkah pri odnoosnom simmetrichnom znakeremennom nagruzenii* [Phenomenological model of fatigue crack growth in ide-plastic infinite plates under uniaxial symmetric alternating loading]. *Applied Mechanics*, V. 41 (51), 12, 116-127.
5. Plashhinskaja, A.V., Bashta, E.T., Dzhurik, E.V. (2015). *Modelirovanie rasprostraneniya ustalostnoj treshhiny s uchetom dvuhosnogo naprjazhennogo sostojaniya u ee vershiny* [Simulation of the propagation of a fatigue crack, taking into account the biaxial stress state at its top]. *Visnik NTUU «KPI». Serija mashinobuduvannja* [Bulletin of NTUU «KPI»], 2 (74), 36-41.
6. Piradov K.A., Rott N.A. (2014). *Treshhinostojkost' betonov na legkih zapolniteljah* [Crack resistance of concrete on lightweight aggregates]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Starodubovskie chtenija* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering. Starodubovsky reading], 160-163.
7. Vostrecov A. G., Jakovickaja G. E. (2014) *Vlijanie vneshnego impul'snogo nizkojenergeticheskogo vozdejstvija na process razrusheniya predvaritel'no nagruzhennyh obrazcov gornyh porod* [Influence of external pulsed low-energy impact on the process of destruction of pre-loaded rock samples]. *Fiziko-*

tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. Geomehanika [Physical and technical problems of the development of mineral resources. Geomechanics], 6. 61-69.

8. Chernikova, T.M., Ivanov, V.V., Mikhailov, E.A. (2007). *Spektral'nyj analiz jelektromagnitnogo izluchenija pri nagruzenii materialov* [Spectral analysis of electromagnetic radiation at materials loading]. Sb. nauchn. trudov Mezhd. nauchno–prakticheskoy konf. «Perspektivnye innovacii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte`2007». [Proc. of Int. scientific and practical conf. "Promising innovations in science, education, production and transport`2007"]. Odessa. Chernomorje, 1, 86–87.

9. Gordienko, Yu.E., Scherban, I.N. (2016). *SVCh rezonatornyj sensor dlja diagnostiki malorazmernih obektov razlichnoj konsistencii* [Microwave resonator sensor for diagnosing small-sized objects of different consistency]. Materialy 7-oj MNPK «Sensorna elektronika ta mikrosistemni tehnologii» [Proc. of the 7th ISPC "Sensor Electronics and Microsystems Technology". Odessa, 43.

10. Subbotin, S.A., Olejnik, A.A. (2008). *Vydelenie nabora informativnyh priznakov na osnove jevoljucionnogo poiska s klasterizaciej* [Selecting a set of informative features based on evolutionary search with clustering] *Iskusstvennyj intellekt* [Artificial Intelligence], 4, 704-711.

11. Subbotin, S.A., Olejnik, A.A. (2007). *Analiz i obrabotka apriornoj informacii v konstruirovanii sistem avtomaticheskogo raspoznavanija* [Analysis and processing of a priori information in the automatic recognition systems designing]. Dnipro, Nauka i osvita [Science and education].

12. Kolesnik, D.Yu., Koval, P.N., Sychenko, V.G. (2007). *Pronikajushhie ingibitory metallokorrozii dlja povyshenija dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij* [Penetrating metal-corrosion inhibitors to increase the durability of reinforced concrete structures]. Materialy 67 MNPK "Problemi ta perspektivi rozvitku zaliznynohoho transportu" [Proc. of the 67th ISPC "Problems and prospects of railway transport development"]. Dnipropetrovskiy natsionalnyy universytet zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana [Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 110.

13. Dubinchik, O.I. (2005). *Vlijanie korrozii betona i armatury na dolgovechnost' proletryh stroenij mostov* [Effect of corrosion of concrete and reinforcement on the durability of bridge span structures]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 6, 109-112.

14. Chernikova, T.M. (2014) *Nauchnye osnovy metoda kontrolja processa razrushenija kompozitov s ispol'zovaniem jelektromagnitnogo izluchenija*. Kemerovo. Disser. doktora tehniceskikh nauk [Dissertation of the doctor of technical sciences].

15. Patent № 82919 Ukraine (2013). *Matrichnij jelektromagnitnij ekran* [Matrix Electromagnet screen], V.A. Dzenzensky, I.I. Sokolovsky, Yu.N. Lavrich et al., 16, 08.27.13.

16. Patent № 87810 Ukraine (2014). *Fraktal'nyj jelektromagnitnij ekran-restrukturizator* [Fractal Electromagnet screen restructuring]. V.A. Dzenzensky, I.I. Sokolovsky, Yu.N. Lavrich et al., 4, 02.25.14.

Лаврич Ю.М., к.т.н.

(старший науковий співробітник, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро)

Плаксіні С.В., д.ф.-м.н.

(завідуючий відділом, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро)

Погоріла Л.М.

(молодший науковий співробітник, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро)

МІКРОХВИЛЬОВІ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ НАДІЙНОСТІ ШЛЯХОВОЇ СТРУКТУРИ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Запропоновано спосіб пасивної локації і реєстрації електромагнітних випромінювань, що виникають в процесі порушення цілісності шляхової структури магнітолевітаційного (Маглев) транспорту, який з урахуванням деяких особливостей

цього транспорту забезпечує створення системи динамічного контролю конструктивної міцності шляховий структури в реальному масштабі часу.

Ключові слова: шляхова структура, тріщина, міцність, динамічний контроль, електромагнітні випромінювання

Lavrich Yu.N., Ph. D. on Tech. sci.,

(senior staff scientist, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro)

Plaksin S.V., Dr. Sci. on Physics and Mathematics,

(department head, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro)

Pogorelaya L.M.

(junior researcher, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro)

MICROWAVE TECHNOLOGIES FOR MONITORING THE MAGLEV WAY STRUCTURE RELIABILITY

Modern high-speed ground vehicles are implemented on the application of magnetic levitation technology, when the vehicle in the process of movement does not concern the way structure. High speeds and small levitation distances create difficulties in ensuring the reliability and safety of such transport functioning, lead to the impossibility of using traditional control means, which requires the development of control methods based on new physical phenomena. Taking into account the distinctive features of a magnetically-levitative vehicle and the degree of influence of its systems on the catastrophic consequences of failure in general, a way structure was proposed as a generalized object of control, and microwave radiation accompanying destruction as an information signal of the process of destruction of the track structure.

A certain relationship has been established between the parameters of electromagnetic emission arising from the cracklings of way structure materials and its strength, which makes it possible to implement a passive non-destructive dynamic control device for the way structure of the high speed transport, for which a high informativeness and high-speed are characteristic and which ensures high reliability and safety of modern high-speed vehicles.

Keywords: way structure, crack, strength, dynamic control, electromagnetic radiation.