

УДК 625.7.08

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКОГО АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Романов А.Ф., Ходасевич А.И., Чернобай И.А.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Разработанный георадарноакустический метод измерений прочности дорожных покрытий основан на измерении модуля упругости E слоев дорожных одежд (СДО) путем измерения скоростей распространения v_1, v_2, \dots, v_n акустических колебаний в каждом слое покрытия по временам распространения радиолокационных сигналов, отраженных от границ слоев дорожных покрытий [1-4]. Модуль E_n определяется с учетом плотности ρ_n по скорости акустических колебаний:

$$E_n = \rho_n \cdot v_n^2. \quad (1)$$

Измерения скорости распространения акустических колебаний реализуется по временам распространения $T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{pn}$ акустических волн, определяемым по моментам выделения фазоамплитудных флуктуаций отраженных радиолокационных сигналов от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через контролируемые покрытия. На основании полученных результатов для времен распространения вычисляются скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем ... и n -ом слоях:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{p1}}; \dots; v_n = \frac{l_n}{T_{pn} - T_{pn-1}}, \quad (2)$$

где $l_1; l_2; \dots; l_n$ – толщины каждого слоя, измеряемые посредством отраженных радиолокационных сигналов по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}, \quad (3)$$

где: c_0 – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; t_1, t_2, \dots, t_n – отметки времени в наносекундах, измеряемые радиолокационным сигналом от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента его приема при отражении от каждой границы между слоями дорожной одежды; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ – величины диэлектрической проницаемости слоев.

Компенсация динамических погрешностей измерений и обеспечение высокой помехоустойчивости при достаточно большой скорости сканирования автомобильной дороги достигается применением опорного, радиолокационного сигнала. Это осуществляется методом адаптивной обработки сигналов георадарно-акустических измерений [5].

Достоинством предложенного метода является то, что вибрационно-акустические колебания слоев являются периодическими с многократным повторением периодов колебаний после возбуждающих импульсных воздействий, например, от воздействий проходящих автомобилей. Исходя из этого, является целесообразным накапливать сигналы путем измерения и регистрации спектров колебаний СДО путем применения функции Фурье-преобразования периодических сигналов. Поэтому на основании уравнений (4) и с учетом того, что резонансная частота f_n каждого слоя обратно пропорциональна двойному времени распространения T_{pn} вибрационно-акустического сигнала, путем несложных преобразований можно получить:

$$v_1 = 2l_1 f_1; \dots; v_n = 2l_n f_n, \quad (5)$$

Окончательно формулы для определения прочности слоев дорожных покрытий на основании уравнений (5) и (1) приобретают вид:

$$E_1 = 4\rho_1 l_1^2 f_1^2; \dots; E_n = 4\rho_n l_n^2 f_n^2. \quad (6)$$

В соответствии с изложенным выше порядком функционирования, заключающимся в реализации алгоритмов измерений по уравнениям (2) ÷ (6), в аппаратном комплексе для повышения достоверности и оперативности измерений применялся более эффективный метод представления сигналов в частотном виде путем реализации функции прямого Фурье-преобразования сигналов. Этот метод за счёт непрерывного усреднения выделяемых сигналов в узких полосах частотного спектра позволил получать более достоверные и уточненные результаты измерений в конкретных величинах частот, в пересчете равных временам распространения сигналов в слоях дорожных одежд в соответствии с формулами (2, 5). Для этого исследуемый участок дорожного покрытия автомобильной дороги приводился в резонанс как коротким ударным импульсом, так и ударно-импульсным возбуждением проходящих по дороге автомобилей. По импульсу синхронизации запускался в работу цифровой осциллограф, который посредством функции Фурье-преобразования регистрировал резонансные вибрационно-акустические колебания дорожной конструкции.

Для повышения точности измерений начало формирования спектра осуществлялось по первому импульсу синхронизации, выделяемому из вибрационно-акустических импульсов внешнего возбуждения, вызываемых проходящими автомобилями. Это позволило получать в автоматическом

режиме измерений достаточно точную информацию о резонансах конструкций дорожных одежд.

По частоте резонанса и толщине слоя покрытия управляющим компьютером автоматически вычислялась скорость распространения вибрационно-акустических колебаний в каждой асфальтобетонной плите в соответствии с уравнениями (5). Далее в соответствии с формулами (6) определялся модуль упругости.

В качестве примера один из конкретных экспериментальных результатов определения модуля упругости получен следующим образом. Например, для среднего слоя автомобильной дороги частота собственных колебаний равна: $f_c = 5\ 670$ Гц (см. рис. 1).



Рисунок 1 – Участок спектрограммы собственных колебаний соответствующий среднему слою покрытия исследуемой дорожной конструкции

По результатам георадарных измерений результат усредненных мгновенных (с частотой 40 МГц) значений толщины среднего слоя составил: 20 см. Следовательно, для среднего слоя автомобильной дороги скорость распространения акустических волн в соответствии с (5) равна: $v_c = 2 \cdot l \cdot f_c = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-2} \cdot 5670 = 2268 \text{ м/с}$.

Модуль упругости соответственно равен: $E = \rho \cdot v_c^2 = 2190 \cdot 2268 \cdot 2268 = 11265 \text{ МПа}$.

С целью получения метрологических оценок и сравнения полученных результатов, в лабораторных условиях были определены модули упругости нескольких слоев, в том числе верхнего и среднего слоев конкретной дорожной конструкции.

Сравнительные лабораторные испытания модулей упругости этих слоев, проведенные по стандартной методике независимым методом,

дали результаты, совпадающие с полученными приборными данными на уровне $\pm 3,0\%$, что для подобных исследований характеризует высокое качество проведенной разработки.

Следовательно, лабораторные исследования и сравнения полученных результатов с приборными данными, полученными в режиме автоматических экспресс-измерений прочности слоев дорожных покрытий, показали высокое качество проведенной разработки.

Литература

1. Чернобай, И.А. Совершенствование георадарной технологии для определения качества автомобильных дорог / А.В. Громыко, А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Материалы 4-ой МНТК «Приборостроение-2011», – Минск, 2011. – С. 295–296.
2. Чернобай, И.А. Георадарноакустическая аппаратура экспресс-контроля качества покрытий автомобильных дорог / А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2013. – 380 с. – С. 296–304.
3. Чернобай, И.А. Функционирование георадарноакустического комплекса по определению прочности слоев автомобильных дорог / А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна. – Минск, 2013. – 380 с. – С. 305–311.
4. Чернобай, И.А. Исследование точности функционирования георадарноакустического аппаратного комплекса по определению прочности дорожных покрытий / А.В. Громыко, А.Ф. Романов, А.И. Ходасевич, И.А. Чернобай // Материалы третьей МНПК «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», – Минск, 28-29 апреля 2015. – С. 208–213.
5. Чернобай И.А., Романов А.Ф., Ходасевич А.И. Метод и аппаратура компенсации динамических погрешностей георадарноакустических измерений прочности дорожных покрытий. – Научно-практический журнал Неразрушающий контроль и диагностика. – № 4. – 2017. – С. 16–33.

УДК 621

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МЕР ВМЕСТИМОСТИ СТЕКЛЯННЫХ

Хомич О.А.¹, Киселёв М.Г.²

¹Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Согласно закону Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» все средства измерений, используемые в сфере законодательной метрологии, должны подвергаться мет-

рологическому контролю с целью обеспечения необходимой точности измерений и защиты прав и законных интересов граждан и государства от последствий неточных и неправильно выпол-