

# РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЯ

К.т.н. В.В. Усик, Д.С.Зубченко, Национальный технический университет «ХПИ», г.Харьков

*Авторами предложен аппаратно-программный комплекс и разработаны методики проведения измерений акустических величин.*

*Авторами запропонований аппаратно-программний комплекс і розроблені методики проведення вимірів акустичних величин.*

*The authors propose a hardware-software complex and developed techniques of measurement of acoustic quantities.*

**Ключевые слова:** акустика помещений, аппаратно-программный комплекс.

## Введение

В современном мире благодаря компьютерным технологиям становится возможным моделирование различных процессов при исследовании распространения звуковых волн в пространстве, формирования звукового поля в помещении, измерение, обработка и анализ большого количества характеристик звукового поля. Научные знания находят прикладное применение в виде программных пакетов, обеспечивающих качественную оценку исследуемых параметров, систем и элементов.

Проблема определения качества акустических характеристик помещения актуальна для проектирования музыкальных студий, концертных залов, театров и кинотеатров, конференц-залов, стадионов и т.д. Решением поставленной задачи является разработка аппаратно-программного комплекса для проведения измерений на базе программного продукта EASERA 1.1.3, а также разработка методик получения результатов исследуемых параметров.

## Цель работы

Целью работы является получение результатов по следующим направлениям:

- 1) разработка методики измерения и анализа общих критериев акустики помещений;
- 2) разработка методики измерения и анализа критериев речевой ясности;
- 3) разработка методики измерения и анализа показателей пространственности звучания;
- 4) разработка методики измерения и анализа критериев прослушивания музыкальных выступлений.

## Основная часть

### Характеристика методов и средств измерения

В настоящее время для проведения акустических измерений используются различные средства и методы. К ним относятся как традиционные аппаратные установки, так и разработанные программы анализа и компьютерного моделирования помещения. Первые хорошо проверенные временем, позволяют получить достаточно точные результаты экспериментов, но

отличаются большим количеством используемых частей, в составе которых содержатся алгоритмы расчетов, которые помогают сократить количество используемой аппаратуры до минимума. При этом снижается влияние человеческого фактора на результаты измерений, но повышаются неточности вследствие автоматического усреднения.

Среди программного обеспечения, используемого для измерений, наиболее распространенными являются следующие программные продукты: EASERA, SysTune, AdobeAudition.

Программный продукт EASERA 1.1.3 является мощной измерительной системой в области акустики помещений. Работающий согласно действующим стандартам качества, он позволяет с достаточной точностью и повторяемостью получать данные и сохранять полученные результаты. Программный продукт поддерживает широкий диапазон стереофонических и бинауральных микрофонов, необходимых для проведения измерений.

Программный пакет SysTune используется для измерений живого звука в режиме реального времени, одновременно отображая временную и частотную информацию с большой скоростью обновления данных. Является простым в использовании, включает в себя возможности виртуального эквалайзера, отображения импульсной характеристики, амплитуды и фазы сигналов[5].

Аудио редактор AdobeAudition 3 владеет мощной инструментальной базой для обработки звука со встроенными измерительными приложениями. Его главным преимуществом является информативный анализатор спектра[6].

На основе анализа программного обеспечения для выполнения работы был выбран программный пакет EASERA. Главными критериями отбора являлись:

- возможность реализации всех методик в одной среде;
- достоверность измерений.

### Разработка методик проведения измерений

Для проведения измерений был предложен аппаратно-программный комплекс(рис.1).



Рис.1.Схема аппаратно-программного комплекса

В состав комплекса входят: измерительное программное обеспечение (ПО), звуковая карта, аудио выход и аудио вход. На персональный компьютер предусматривается установить программное обеспечение EASERA 1.1.3 и драйвер звуковой карты. На аудио выход, в качестве которого используется громкоговоритель, через звуковую карту подается тестовый сигнал, генерируемый в измерительной программе. Красными стрелками отображен маршрут сигнала. При помощи микрофона, который является аудио входом, осуществляется запись сигнала, излученного громкоговорителем (на схеме выражается фиолетовой стрелкой). Через звуковую карту сигнал попадает на вход компьютера, где анализируется программным продуктом, что показано на схеме в виде синих стрелок. Таким образом, для измерительного комплекса входными данными является полученный аудио сигнал, излучаемый громкоговорителем и на который накладывает свой отпечаток исследуемое помещение. Выходными данными считаются результаты обработки этого сигнала программным продуктом EASERA.

На базе комплекса была разработана общая методика проведения измерений, которая содержит несколько этапов.

1. Подготовительный. К нему относится выбор каналов измерения, калибровка входа и выхода. Проводится этот этап для выполнения первой работы, в случае необходимости, повторяется для других работ. Также в нем осуществляется регулирование уровней громкости для обеспечения безопасности при проведении работы, так как высокий уровень может повредить ушам исследователя и вывести из строя громкоговоритель.

2. Измерительный этап. Этот этап представлен выбором тестовых сигналов для измерений. К ним относятся стандартные программные сигналы, такие как розовый и белый шумы, развертки и синусоидальные сигналы. Существует возможность использования в качестве тестового сигнала образцов речи и музыки. Проведение измерения предполагает непосредственно выбор необходимого параметра в качестве измеряемой величины, определение количества тестовых сигналов и степени усреднения результатов.

3. Заключительный. Состоит из получения графических зависимостей измеряемых величин, обработки и анализа результатов измерений.

К общим параметрам оценки качества акустики залов относят: время реверберации  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  и  $T_{30}$ , раннее время спада EDT и коэффициент низкого тона BR. Для измерения EDT и времени реверберации используется отклик на импульсное воздействие в помещении (RIR). Субъективно оцененная продолжительность времени реверберации зависит от уровня возбуждения сигнала и от уровня шума. Необходимого динамического диапазона оценки трудно достигнуть даже при объективном измерении, особенно в низкочастотном диапазоне. Поэтому, время реверберации определяется, измеряя затухание уровня звука в диапазоне от -5 дБ до -35 дБ и называется  $T_{30}$ . Начальное время реверберации (IRT,  $T_{15}$ , между -5 дБ и -20 дБ) и раннее время спада (EDT,  $T_{10}$ , между 0 дБ и -10 дБ) больше соответствует субъективной оценке продолжительности реверберации, особенно в объемах низкого уровня. EASERA вычисляет времена реверберации  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  в частотно взвешенной

форме (опционально треть октавы или фильтрованную октаву) и в соответствии с ISO3382 определяет их энергетическими диапазонами от -5 дБ до -15 дБ ( $T_{10}$ ), от -5 дБ до -25 дБ ( $T_{20}$ ) и от -5 дБ до -35 дБ ( $T_{30}$ ). Крутизна обратно интегрируемого логарифмического импульсного отклика помещения позволяет измерить время реверберации. Для минимизации погрешности измерения, из-за недостаточного отношения сигнал/шум, необходимо ограничивать время измерения (время интегрирования). Рекомендуется, чтобы время измерения приблизительно было выбрано от 0,6 до 0,7 от ожидаемого выбранного времени реверберации  $T_{exp}$ . В дополнение к ограничению времени измерения, существуют процедуры снижения шума или компенсации, которые также могут быть использованы.

Отдельным критерием для реверберационной частотной характеристики на низких частотах является коэффициент низкого тона (КНТ), который определяется согласно [1]

$$BR = \frac{T_{20,125} + T_{20,250}}{T_{20,500} + T_{20,1000}} = \frac{T_{20,Нч}}{T_{20,Сч}}$$

где  $T_{20, x}$  - значение времени реверберации  $T_{20}$  на соответствующей  $x$  – октавной частоте.

Для музыки, желательно значение КНТ - BR  $\approx 1.0$  до 1.3, а для речи, наоборот, должно быть самое большое значение BR  $\approx 0.9$  до 1.0.

Полученные аппаратно-программным комплексом по разработанной методике результаты общих параметров оценки качества акустики залов представлены на рис.2.

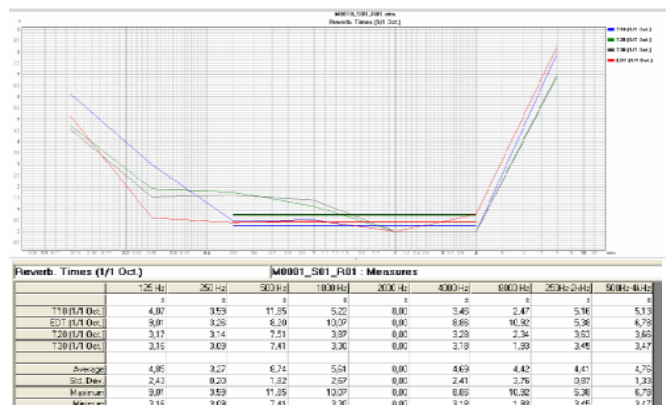


Рис. 2. Результаты измерений времени реверберации

В настоящее время разработано достаточно большое количество объективных методов оценки разборчивости, основные из которых:

- 1) AI (articulation Index) – индекс артикуляции;
- 2) %AL<sub>cons</sub> (percentage Articulation Loss of Consonants) – процент артикуляционных потерь согласных;
- 3) STI (speech transmission index) – индекс передачи речи;
- 4) RASTI (rapid speech transmission index) – индекс передачи быстрый речи;
- 5) SII (speech intelligibility index) – индекс разборчивости речи и др. (стандарты ISO/TR-4870, ANSI S3.2, S3.5; IEC 268-16 и др.)

## Технология приборостроения

Эти методы делятся на две группы – аддитивную и основанную на модуляционной передаточной функции. Первая группа базируется на том предположении, что результирующая разборчивость речи определяется суммой вкладов в отдельных частотных полосах, а величина вклада зависит от отношения сигнала к шуму в каждой полосе. К этой группе относятся AI, AI<sub>cons</sub> и SII. Вторая группа методов для объективной оценки разборчивости построена на оценке модуляционной передаточной функции системы. К их числу относятся методы STI и RASTI. В EASERA измерение показателей разборчивости основано на модуляционной передаточной функции. При помощи этого программного пакета можно получить графический вид MTF, а также численные значения AI<sub>cons</sub>, STI, RaSTI. Значения AI<sub>cons</sub> объединены рейтинговой шкалой для оценки словесной речевой ясности (табл.1). Долгое время реверберации вызывает усиление потери артикуляции, оно действует как шум на следующие сигналы, и таким образом уменьшает ясность.

Информацию об акустических свойствах помещения можно получить из измерений RASTI интерпретируя MTF. Если модуляционная передаточная функция имеет плоский вид, то источником помехи является шум [4]. В случае ее снижения источником помехи считается реверберация. Когда форма MTF имеет сложный вид, то имеет место дискретное эхо, влияющее на разборчивость в помещении.

Таблица 1

Распределение результатов речевой ясности

AI <sub>cons</sub>	Оценка речевой ясности
≤ 3%	идеальная
= 3%	очень хорошая
= 8%	хорошая
≥ 11% to 20 %	плохая
>20%	бесполезная (предельное значение 15%)

Основанные на сравнении результатов субъективных экспериментов с максимальной возможной ясностью слогов 96%, значения RASTI классифицированы в субъективных оценках для слоговой ясности согласно таблице 2.

Таблица 2

Соответствие слоговой ясности значениям RASTI

Слоговая ясность	Значения RASTI
бедная	0-0.3
удовлетворительная	0.3-0.45
хорошая	0.45-0.6
очень хорошая	0.6-0.75
отличная	0.75-1

Полученные результаты измерений представлены на рис.3.

STI MTF, MTF	M0002_SB1_R01 - Measures
0.03125	0.389 0.335 0.053 0.423 0.226 0.025 0.047
0.0625	0.388 0.417 0.053 0.463 0.328 0.196 0.134
0.125	0.390 0.345 0.057 0.463 0.328 0.020 0.072
0.25	0.322 0.303 0.025 0.432 0.225 0.002 0.072
0.5	0.390 0.305 0.053 0.422 0.225 0.000 0.069
1	0.375 0.311 0.020 0.441 0.247 0.000 0.095
2	0.324 0.305 0.053 0.422 0.227 0.000 0.066
4	0.390 0.334 0.053 0.405 0.278 0.071 0.044
8	0.390 0.341 0.053 0.451 0.281 0.047 0.062
16	0.402 0.071 0.053 0.248 0.047 0.064
32	0.390 0.362 0.053 0.463 0.368 0.009 0.064
64	0.329 0.342 0.072 0.470 0.368 0.047 0.099
128	0.393 0.365 0.068 0.481 0.472 0.046 0.064
256	0.324 0.343 0.072 0.452 0.358 0.047 0.099
MTI	0.357 0.403 0.038 0.426 0.345 0.075 0.063
STI	0.330
M020173	0.337
STI_000	0.330
STI_000dB	0.330
AI	0.485
Gain: STI_000dB	0.347
Gain: STI_000dB	0.339

Рис. 3. Результаты измерений разборчивости

К параметрам вносящим наибольший эффект в ощущение пространственности звучания относят коэффициент внутрислуховой кросс корреляции и боковую энергетическую долю.

Внутрислуховая (интерауральная) корреляция измеряется при помощи искусственной головы и сравнивает фазовые положения левого и правого канала. Ее степень определяется в диапазоне от 1 до 0, где 1 соответствует полной корреляции сигналов, а 0 – ее отсутствию. В соответствии с ISO 3382 она вычисляется для отдельных октавных полос при помощи трёх отдельных временных периодов импульсной характеристики. EASERA вычисляет первую 80-мс характеристику импульсного отклика («Early», IACC<sub>E</sub>), часть после 80 мс импульсной характеристики («Late», IACC<sub>L</sub>), а также их общую длительность ("Full", IACC<sub>F</sub>). Если сигналы, приходящие в левое и правое ухо, будут различаться, то есть коэффициент кросс корреляции между ними будет уменьшаться в определенных пределах, то это создает ощущение расширения источника звука.

Для значений IACC<sub>E</sub> или  $\rho = (1 - IACC_E; 500, 1000, 2000 \text{ Гц})$  согласно [1] определяются следующие категории качества для концертных залов, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Категории качества концертных залов

IACC <sub>E</sub>	$\rho$	Категория качества
0,28 - 0,38	0,62 - 0,72	от отличного до превосходного
0,39 - 0,54	0,46 - 0,61	от хорошего до отличного
0,55 - 0,59	0,41 - 0,45	достаточно хорошо

Объективной мерой для полного акустического впечатления от помещения является боковая эффективность LE, которая [1] определяется отношением боковой энергии в диапазоне от 25 до 80 мс к всесторонней звуковой энергии (от 0 до 80 мс). Чем выше боковая эффективность, тем акустически «шире» кажется источник звука. Согласно Баррону звуковые отражения, пришедшие со стороны положения во временном промежутке от 5 до 80 мс слушателя, отвечают за восприятие акустической протяженности источника звука. По аналогии с боковой эффективностью определяется боковая доля

$$LF = \frac{E_{80BI} - E_{5BI}}{E_{80}}$$

где  $E_{xBI}$  – звуковой энергетический компонент, измеренный двунаправленным (в виде 8-ки) микрофоном (градиентным микрофоном).

Для субъективной оценки кажущегося источника звука (КИЗ), например, на сцене, ранние отражения, пришедшие на места слушателя со стороны наиболее важны, по сравнению с другими направлениями. Поэтому отношение между приходящими боковыми

компонентами звуковой энергии и прибывающими со всех сторон за время до 80 мс, определяется и вычисляется в виде их десятичного логарифма – LEM и LFM. Относительно субъективных оценок LE(LEM) и LF(LFM) были предложены следующие значения благоприятных диапазонов:

- 1)  $0.3 < LE < 0.8$  или  $-5 \text{ дБ} < LEM < -1 \text{ дБ}$ ;
- 2)  $0.10 < LF < 0.25$  или  $-10 \text{ дБ} < LFM < -6 \text{ дБ}$ .

Понятие "пространственности" складывается из двух ощущений: "окружение" звуком и "кажущееся расширение источника". По результатам исследований, «окружение звуком» связано с диффузностью звукового поля, а ощущение "расширения источника звука" ( хора, оркестра и др.) - с уровнем энергии боковых отражений.

Боковые отражения, отвечающие за субъективные эффекты вариаций, находятся с частотным диапазоном в следующих отношениях:

- 1) LF-октавный частотный диапазон  $125 \text{ Гц} \geq LF \geq 500 \text{ Гц}$  представляет «окружение звуком»;
- 2) LF- октавный частотный диапазон  $500 \text{ Гц} > LF \geq 4000 \text{ Гц}$  дает ощущение «расширения источника»;
- 3) LF- октавный частотный диапазон  $LF > 4000 \text{ Гц}$ , в нем возникает сдвиг образа.

Пример полученных результатов измерений представлен на рис.4-5.

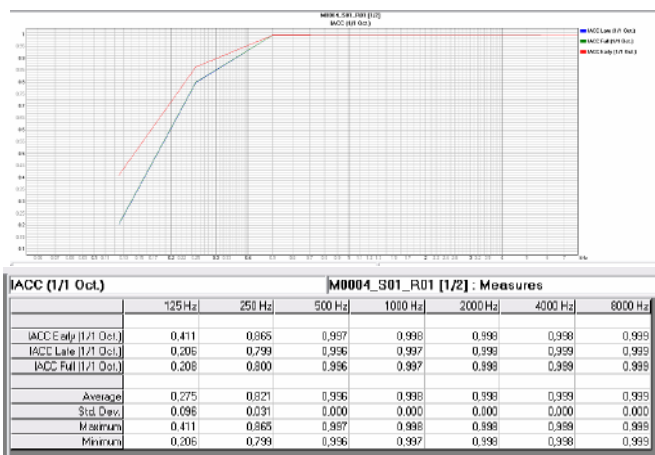


Рис. 4. Результаты измерений IACC

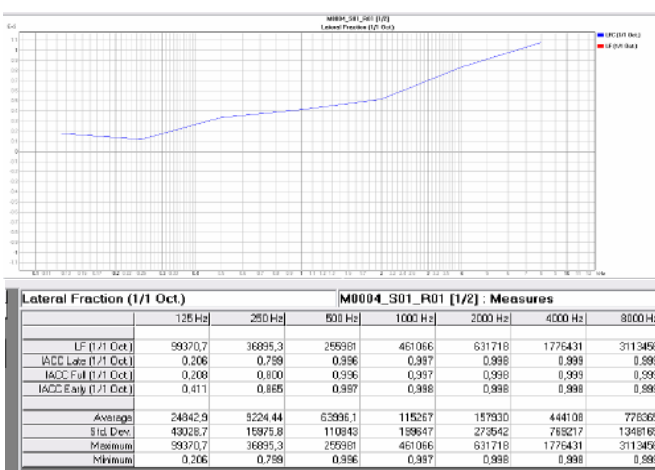


Рис. 5. Результаты измерений боковой доли LF

Оценка качества акустики помещений, связанная с положением источника звука и слушателя в случае для музыкальных представлений, представлена следующими объективными качественными критериями: показателем прямого звука  $C_7$ , показателем речевой ясности  $C_{50}$  и показателем музыкальной ясности  $C_{80}$ .

Показатель  $C_7$ -критерий субъективного восприятия близости или непосредственности источников звука (певцов, оркестра, солистов). Для его определения производится моноуральное измерение при помощи всенаправленного микрофона К, а значение уровня прямого звука определяется

$$C_7 = 10 \log_{10} \left( \frac{E_7}{E_\infty - E_7} \right),$$

$$E_{x,K} = \int_0^{x \text{ мс}} p_K^2(t) dt,$$

где  $E_{x,K}$  - совокупная энергия квадрата импульсного отклика помещения  $p_K^2(t)$  до  $x$  мс после прямого звука.

Показатель  $C_{50}$  имеет отношение к разборчивости речи

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left( \frac{E_{50}}{E_\infty - E_{50}} \right),$$

Для определения показателя  $C_{50}$  не существует каких-либо нормативных правил акустики помещения. Отношение между речевой ясностью и определением показателя  $C_{50}$  дает оценку, согласно которой  $C_{50}$  должен быть  $\geq -2$  дБ. Это помогает избежать уменьшения ясности слога ниже 80%. Ясность фразы (текстовая ясность), благодаря контексту является выше, чем ясность слога, и составляет 95%. Значение  $C_{50} = -2$  дБ считается нижней допустимой границей для хорошей речевой или текстовой ясности.

Показатель ясности  $C_{80}$  важен для временной регистрируемой ясности музыкальных произведений, особенно для быстрых музыкальных отрывков.

$C_{80}$  вычисляется

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left( \frac{E_{80}}{E_\infty - E_{80}} \right).$$

Субъективная оценка ясности  $C_{80}$  дается на основе исследований Абдель Алима, согласно которым достаточная музыкальная ясность должна быть получена при следующих значениях:

- 1)  $C_{80} \geq -1,6$  дБ для классической музыки (Моцарта, Гайдна);
- 2)  $C_{80} \geq -4,6$  дБ для романтической музыки (Брамс, Вагнер);
- 3)  $C_{80} \geq -3$  дБ для приемлемого звучания музыки разных направлений;
- 4)  $C_{80} \geq -5$  дБ для ритуальной музыки (Шопен).

Пример полученных результатов измерений представлен на рис.6.

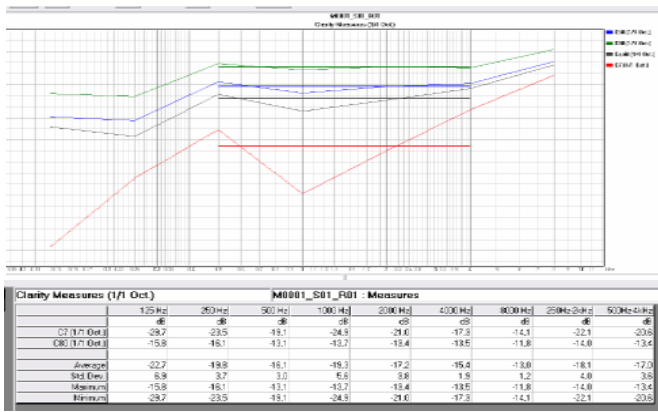


Рис. 6. Результати вимірювань C<sub>7</sub>, C<sub>50</sub>, C<sub>80</sub>

**Висновки**

На основі апаратно-програмного комплексу, запропонованого для проведення вимірювань, були отримані практичні результати по поставленим напрямкам досліджень.

УДК 69. 075

## ЗАДАЧА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ МАШИН

К.т.н. Т.В. Плуґіна, В.О. Стоцький, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

У даній роботі розглядається задача інтелектуалізації сучасних будівельно-дорожніх машин. Пропонується структурна схема інтелектуалізації. Висунуто критерії, що визначають необхідність і можливість використання діагностичного параметру при безперервному моніторингу технічного стану машини.

В даній роботі розглядається задача інтелектуалізації сучасних будівельно-дорожніх машин. Пропонується структурна схема інтелектуалізації. Висунуто критерії, що визначають необхідність і можливість використання діагностичного параметру при безперервному моніторингу технічного стану машини.

The task of intellectualization modern road-building machines is considered. The block diagram of intellectualization is proposed. Criteria determining the need for and use of diagnostic parameters with monitoring of the technical condition of the car are nominated.

**Ключові слова:** інтелектуалізація, моніторинг технічного стану, експлуатація будівельно-дорожніх машин

**Вступ.** Інтелектуалізація будівництва зараз засновується на широкому використанні машин різного призначення зі змінними робочими органами, що адаптуються під робочий процес, сенсорним обслуговуванням та комп'ютерним управлінням. Це необхідно напрямки у розробці високо продуктивної дорожньо-будівельної техніки.

**Аналіз літератури та досягнень.** На сучасному етапі підвищення ефективності дорожньо-будівельних робіт забезпечується реалізацією іновативних тенденцій машинобудування [1]:

Полученные методики проведения исследований позволили сформировать лабораторный практикум для студентов по дисциплинам "Измерения на звуковых частотах", "Акустика студий звукового и телевизионного вещания", "Теоретические основы акустики" в рамках подготовки бакалавров по направлению "Акустотехника".

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Fundamentals to perform acoustical measurements/ Dr. W. Ahnert, Dr. W. Schmidt//Appendix to EASERA. - 2005. - P. 1-49p.
2. EASERA Users Manual/Dr.W. Ahnert, Dr. W. Schmidt. - 2005. - 212 p.
3. EASERA Tutorial/Dr. W. Ahnert,Dr.W. Schmidt. -2006. - 170p.
4. Алдошина И. Субъективные и объективные методы оценки разборчивости речи// Звукорежиссер. – 2002. - №8. – с.49-51.
5. EASERA SysTune Software Manual/Dr. W. Ahnert,Dr.W. Schmidt. -2007. – 142p.
6. AdobeAudition 2.0. Профессиональная обработка звука: официальный учеб. Курс: [пер. с англ.]. – Москва: Издательство ТРИУМФ, 2006. – 288 с.: ил.

- повна комп'ютеризація машин;
- розвиток бортових комп'ютерних систем управління та контролю;
- розвиток високого рівня інтелектуалізації машин.

Сучасні інформаційно-технологічні системи змінюють структуру механізації будівельних робіт. Практична реалізація концепції електронного офісу поступово приводить до зміни стилю і методів керування [2]. Спостерігається інтеграція алгоритмічних методів керування складними об'єктами й методів штучного інтелекту для завдань з невизначеністю вихідної інформації. До таких завдань можна віднести: оцінку ситуації; прогноз поведінки об'єкта в штатному режимі та розвитку аварійних ситуацій; синтез і оцінку можливих дій оператора й вибір найкращих [3].

Відмінною рисою інтелектуальних систем є здатність до планування поведінки, адаптації й навчання.

Розвиваються та впроваджуються мережочентричні технології в ефективному супроводженні дорожньо-будівельної техніки [4].

Розвивається більш ускладнена структура системи інтелектуалізації будівельно-дорожніх машин (БДМ). Основними підсистемами цієї структури є:

- підсистема високошвидкісних комп'ютерних пристроїв;
- підсистема інформаційних високоточних сенсорів;
- підсистема математичних моделей оптимізації параметрів та режимів роботи машин.

Кожна з цих підсистем характеризується набором програмно-технічного забезпечення зі своїми вимогами щодо функціонування та експлуатації (рис.1).