

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Мирзаев Соипжон Соипович – доцент

Абдужабборов Асилбек Гайрат ўғли - студент

Национальный исследовательский университет “ТИИИМСХ”

Аннотация. В статье представлено автоматическое устройство для определения стрессового состояния растений на основе регистрации акустической эмиссии в слышимом диапазоне частот (1-20 кГц). В качестве первичного преобразователя используется электретный микрофон СМА-4544PF-W, обладающий высокой чувствительностью и низким уровнем шумов. Обработка сигналов осуществляется с применением микроконтроллера Arduino и методов спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье. Предложен интегральный индекс акустического стресса, экспериментально подтверждающий возможность ранней диагностики стрессовых состояний растений.

Ключевые слова: стресс растений, акустическая эмиссия, СМА-4544PF-W, Arduino, сигнал, автоматика, датчик, уровень, частота, БПФ, индекс стресса.

Введение. Современное сельское хозяйство требует внедрения интеллектуальных систем мониторинга состояния растений, обеспечивающих раннее выявление стрессовых воздействий, таких как дефицит влаги, температурные перегрузки и механические повреждения [1].



Рис.1. Традиционные методы диагностики

Традиционные методы диагностики, основанные на визуальной оценке или биохимическом анализе, являются трудоёмкими и часто не позволяют обнаружить стресс на ранней стадии (рис.1) [2].

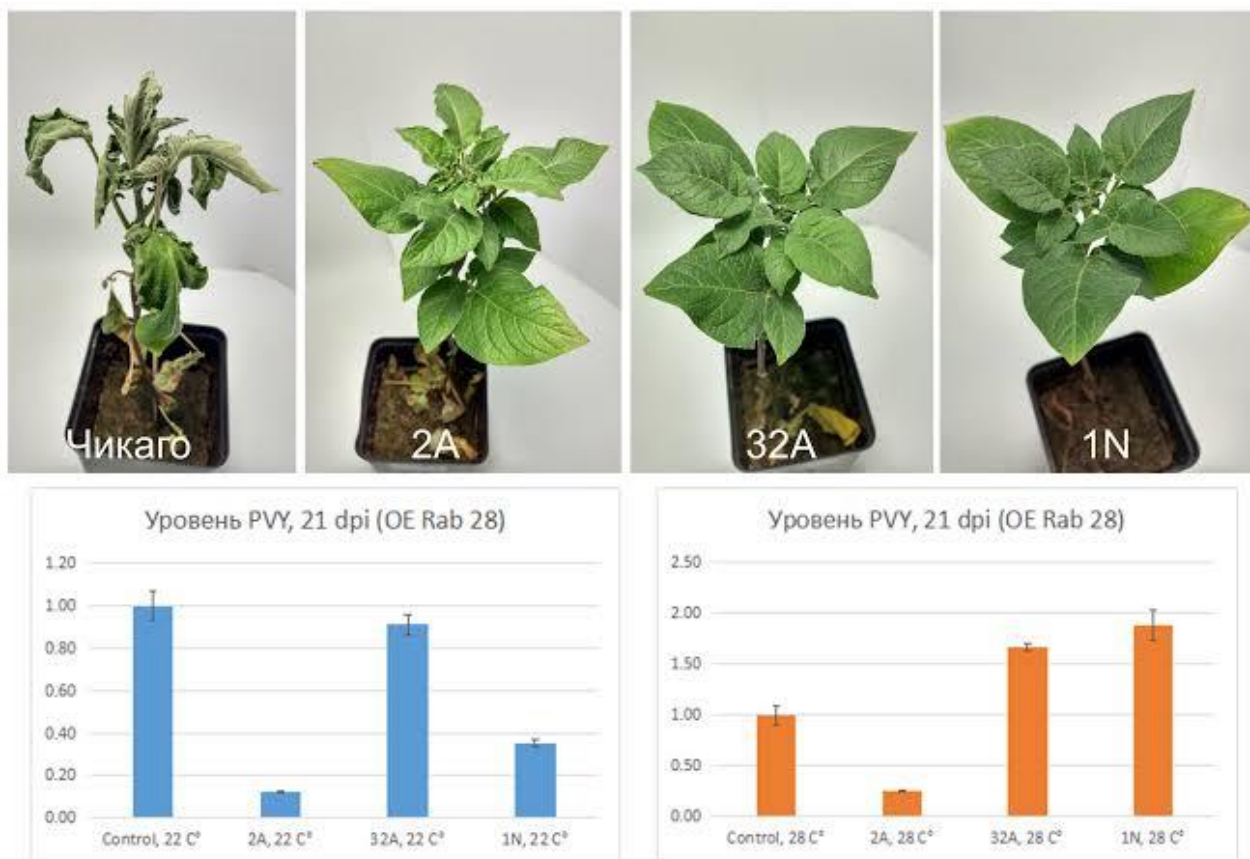


Рис.2. Регистрация акустических сигналов

Перспективным направлением является использование **акустической эмиссии растений**, обусловленной микромеханическими процессами в тканях растения. Регистрация акустических сигналов в слышимом диапазоне частот (1-20 кГц) с использованием чувствительных микрофонов позволяет реализовать неинвазивный и автоматизированный метод диагностики (рис.2) [3].

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка аппаратно-программного устройства на базе микроконтроллера Arduino и электретного микрофона СМА-4544PF-W для определения стрессового состояния растений по параметрам акустической эмиссии [4].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1. разработать структурную и электрическую схему устройства; 2. реализовать алгоритм цифровой обработки акустических сигналов; 3. определить информативные параметры акустической эмиссии; 4. сформировать индекс

акустического стресса растения; 5. экспериментально оценить работоспособность системы [5].

Акустическая эмиссия растений в диапазоне 1-20 кГц возникает вследствие быстрых микромеханических процессов, таких как: 1. изменения тургорного давления клеток; 2. кавитационные явления в сосудистой системе; 3. деформация клеточных стенок при обезвоживании. Указанные процессы сопровождаются формированием кратковременных акустических импульсов в диапазоне частот **1-20 кГц**, интенсивность и частота появления которых возрастают при усилении стрессового воздействия [6].

Электретный микрофон СМА-4544PF-W характеризуется следующими параметрами: 1. рабочий диапазон частот: 20 Гц - 20 кГц; 2. высокая чувствительность; 3. низкий уровень собственных шумов; (рис.3) [7].

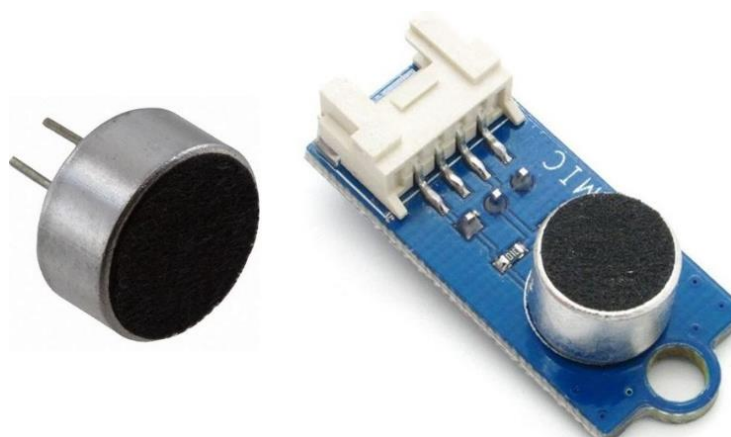


Рис.3. Электретный микрофон СМА-4544PF-W

Таблица 1. Технические параметры электретного микрофона

СМА-4544PF-W

Чувствительность	44 дБ
Стандартное рабочее напряжение	3V DC
Ток	Подача 500 мкА
Диапазон частот	20 Гц ~ 20 кГц
Импеданс	2,2 кОм
Диапазон напряжения	3 В ~ 10 В

S/N соотношение

60dB

Данные характеристики делают его пригодным для регистрации слабых акустических сигналов, возникающих в тканях растений [7].

Для анализа акустического сигнала применяется быстрое преобразование Фурье:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N},$$

(1)

где: $x(n)$ - дискретный сигнал акустической эмиссии,
 N - число отсчётов.

Для интегральной оценки стрессового состояния вводится индекс:

$$S_a = \alpha N_c + \beta \bar{P} + \gamma A_{max},$$

(2)

где: N_c - количество акустических импульсов за единицу времени;

$\bar{P}$ - средняя спектральная мощность в диапазоне 1-20 кГц;

A_{max} - максимальная амплитуда сигнала;

α, β, γ - весовые коэффициенты.

При превышении порогового значения $S_a > S_{кр}$ фиксируется стрессовое состояние растения.

Экспериментальные исследования проводились на вегетирующих растениях при нормальных условиях и при моделировании стрессовых воздействий (ограничение полива). Акустические сигналы регистрировались с использованием микрофона СМА-4544PF-W, установленного вблизи стебля растения [8].

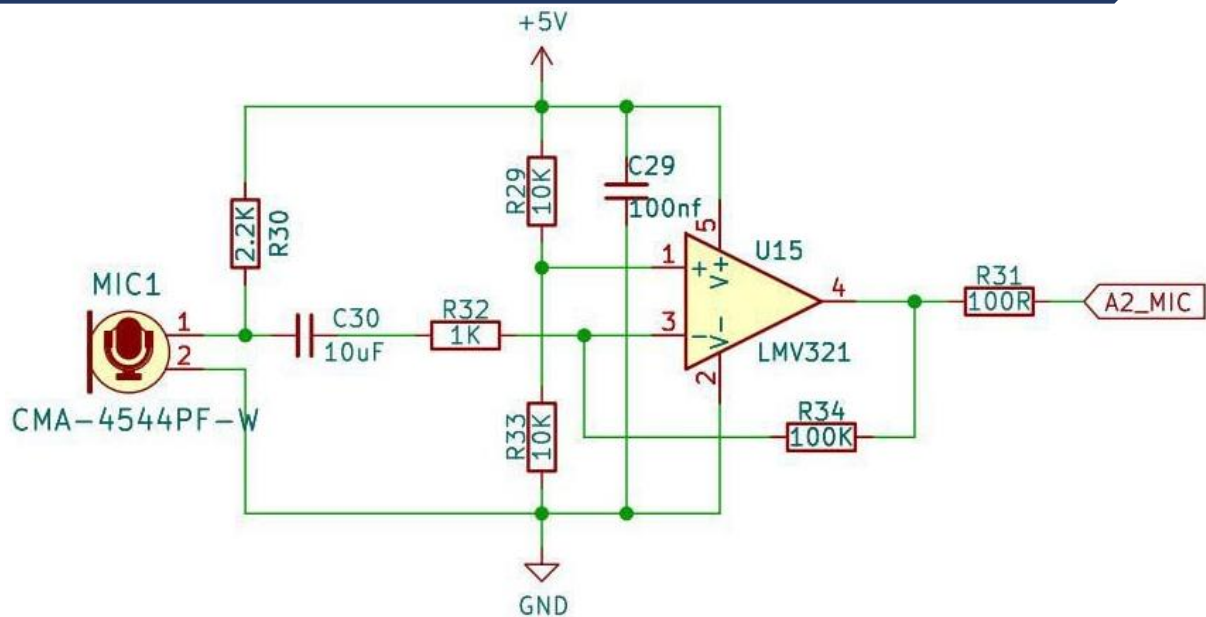


Рис.4. Принципиальная схема электретного микрофона CMA-4544PF-W

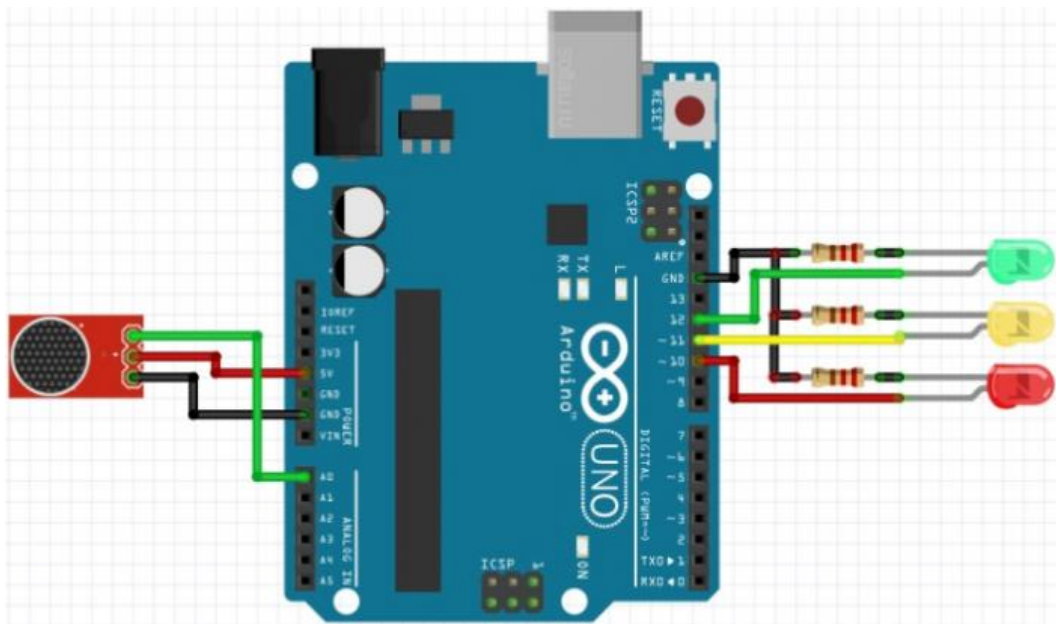


Рис.5. Схема соединения **Arduino** с электретным микрофоном CMA-4544PF-W

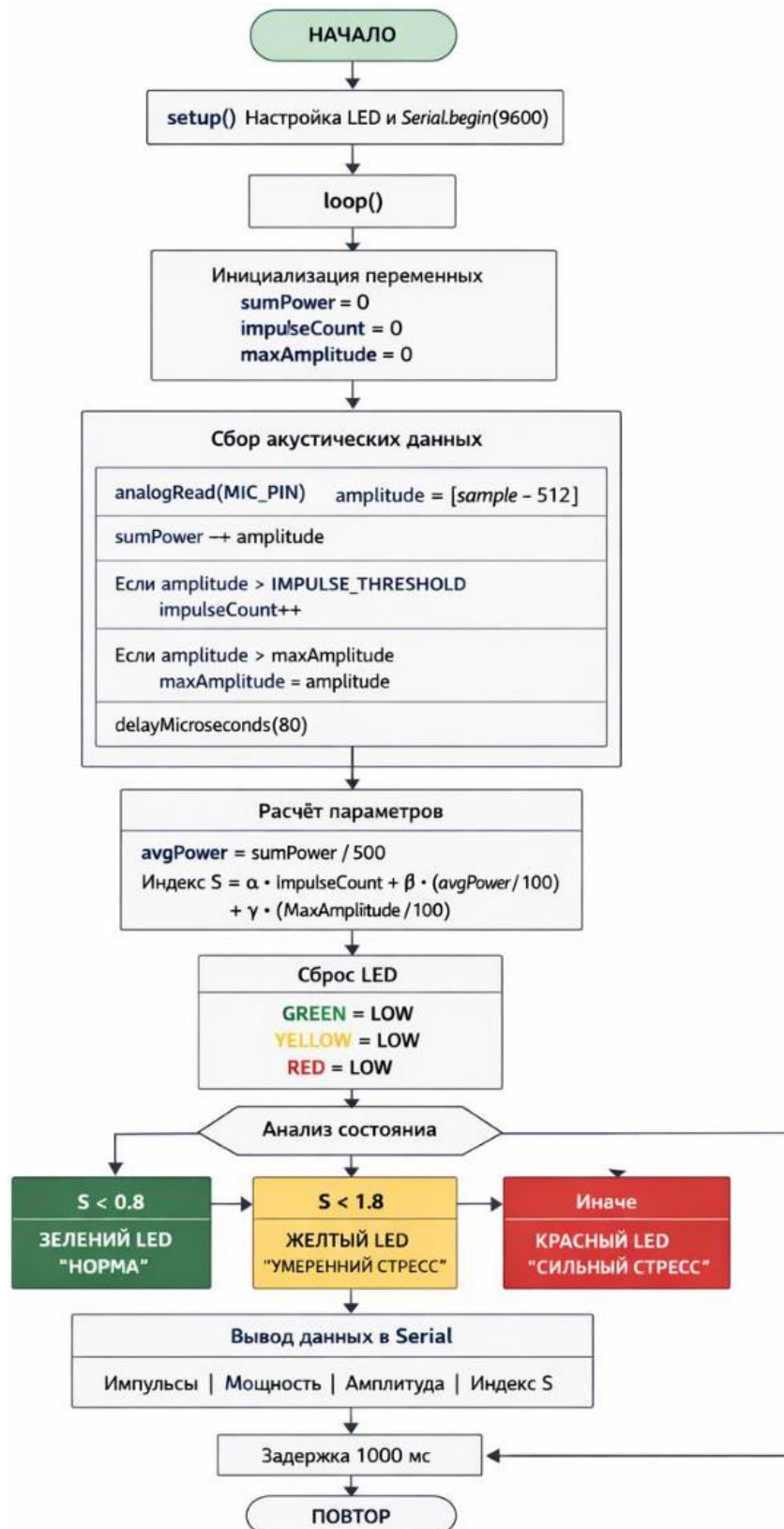


Рис.6. Блок-схема алгоритма управления объекта

Ниже рабочий и понятный код алгоритма для Arduino, который определяет 3 состояния стресса растения по акустической эмиссии (1-20 кГц) и связывает их с тремя светодиодами.

Код адаптирован под электретный микрофон CMA-4544PF-W, использует:

- подсчёт акустических импульсов,
- амплитудный анализ,
- простой индекс стресса,
- 3 LED-индикатора:

● норма, ● умеренный стресс, ● сильный стресс.

Таблица 2. Логика определения состояния

Индекс стресса S	Состояние	LED
$S < 0.8$	Норма	●
$0.8 \leq S < 1.8$	Умеренный стресс	●
$S \geq 1.8$	Сильный стресс	●

Разработанный алгоритм предназначен для автоматического определения стрессового состояния растений на основе анализа сигналов акустической эмиссии в диапазоне частот **1-20 кГц**, регистрируемых электретным микрофоном **CMA-4544PF-W**, подключённым к микроконтроллеру **Arduino** [9].

Акустические сигналы растений, возникающие при водном дефиците, механическом воздействии и физиологических нарушениях, характеризуются изменением **амплитуды** и **частоты импульсов**. Эти параметры используются в алгоритме в качестве информативных признаков стресса. В зависимости от текущего состояния активируется соответствующий светодиод, обеспечивая **наглядную визуальную индикацию** физиологического состояния растения в реальном времени [9].

Программное обеспечения на языке C++ для управления объекта.

#define MIC_PIN A0 #define LED_GREEN 3 #define LED_YELLOW 5 #define LED_RED 6	float stressIndex = alpha * impulseCount + beta * avgPower / 100.0 + gamma * maxAmplitude / 100.0;
--	---

<pre>#define SAMPLE_COUNT 500 #define NOISE_THRESHOLD 25 #define IMPULSE_THRESHOLD 80 float alpha = 0.05; float beta = 0.6; float gamma = 1.2; void setup() { pinMode(LED_GREEN, OUTPUT); pinMode(LED_YELLOW, OUTPUT); pinMode(LED_RED, OUTPUT); Serial.begin(9600); } void loop() { long sumPower = 0; int impulseCount = 0; int maxAmplitude = 0; for (int i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++) { int sample = analogRead(MIC_PIN); int amplitude = abs(sample - 512); sumPower += amplitude; if (amplitude > IMPULSE_THRESHOLD) { impulseCount++; } if (amplitude > maxAmplitude) { maxAmplitude = amplitude; } delayMicroseconds(80); } float avgPower = (float)sumPower / SAMPLE_COUNT;</pre>	<pre>digitalWrite(LED_GREEN, LOW); digitalWrite(LED_YELLOW, LOW); digitalWrite(LED_RED, LOW); if (stressIndex < 0.8) { digitalWrite(LED_GREEN, HIGH); Serial.println("СОСТОЯНИЕ: НОРМА"); } else if (stressIndex < 1.8) { digitalWrite(LED_YELLOW, HIGH); Serial.println("СОСТОЯНИЕ: УМЕРЕННЫЙ СТРЕСС"); } else { digitalWrite(LED_RED, HIGH); Serial.println("СОСТОЯНИЕ: СИЛЬНЫЙ СТРЕСС"); } Serial.print("Импульсы: "); Serial.print(impulseCount); Serial.print(" Мощность: "); Serial.print(avgPower); Serial.print(" Амплитуда: "); Serial.print(maxAmplitude); Serial.print(" Индекс S = "); Serial.println(stressIndex); delay(1000); }</pre>
--	--

В ходе экспериментов анализировались временные и частотные характеристики акустических сигналов в нормальном и стрессовом состояниях растений. Результаты показали увеличение количества акустических импульсов и

спектральной мощности сигнала при развитии стрессового состояния, что подтверждает информативность предложенного метода.

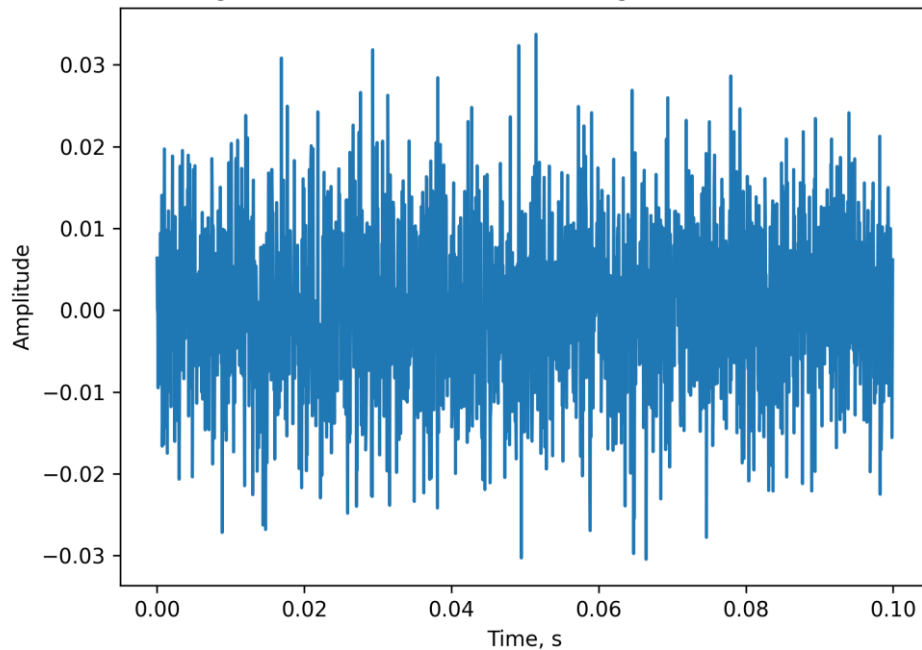


Рис.7. Временная диаграмма сигнала (норма)

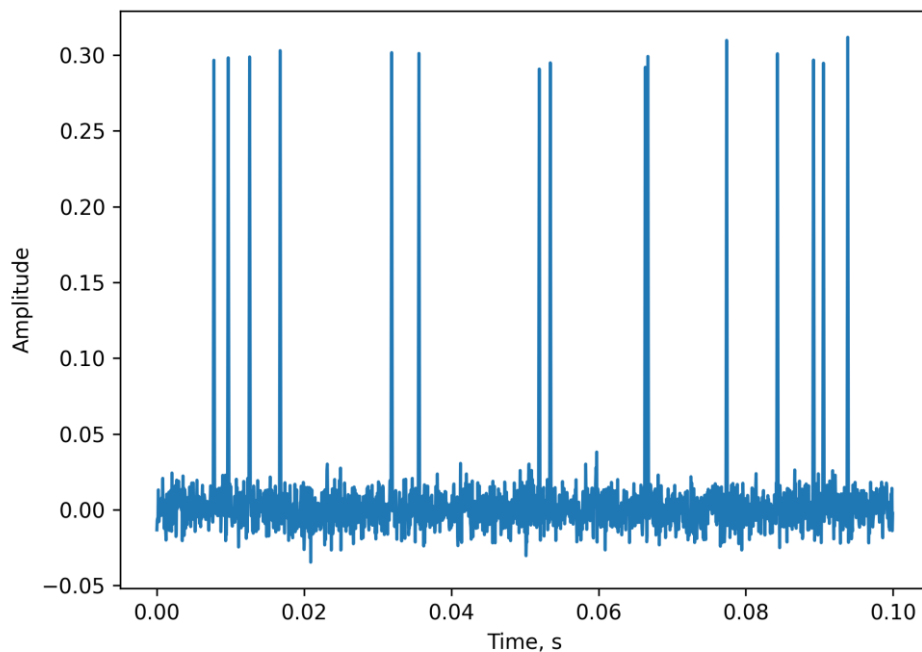


Рис.8. Временная диаграмма сигнала (стресс)

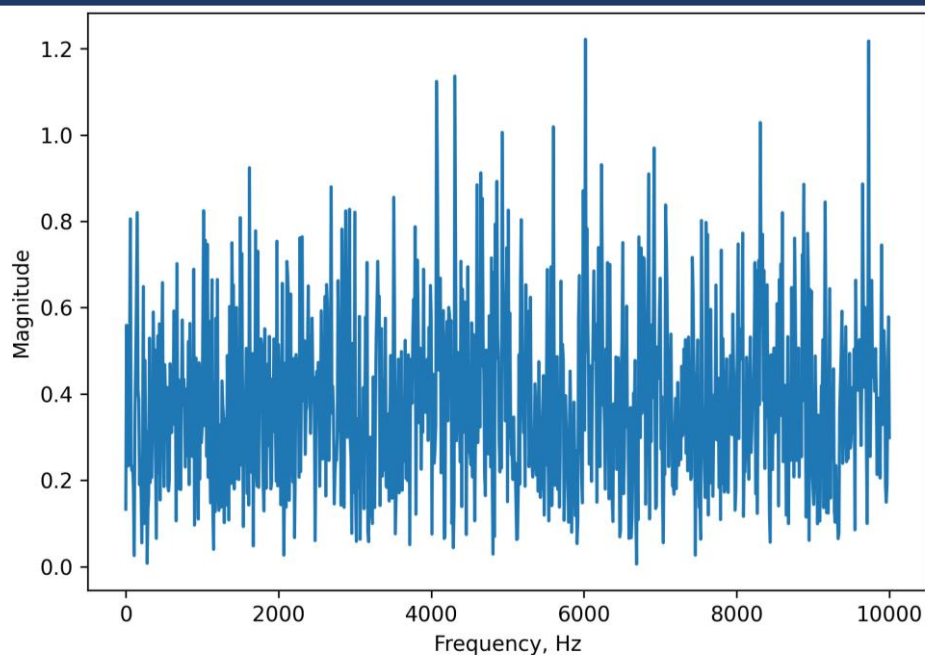


Рис.9. Частотный спектр (норма)

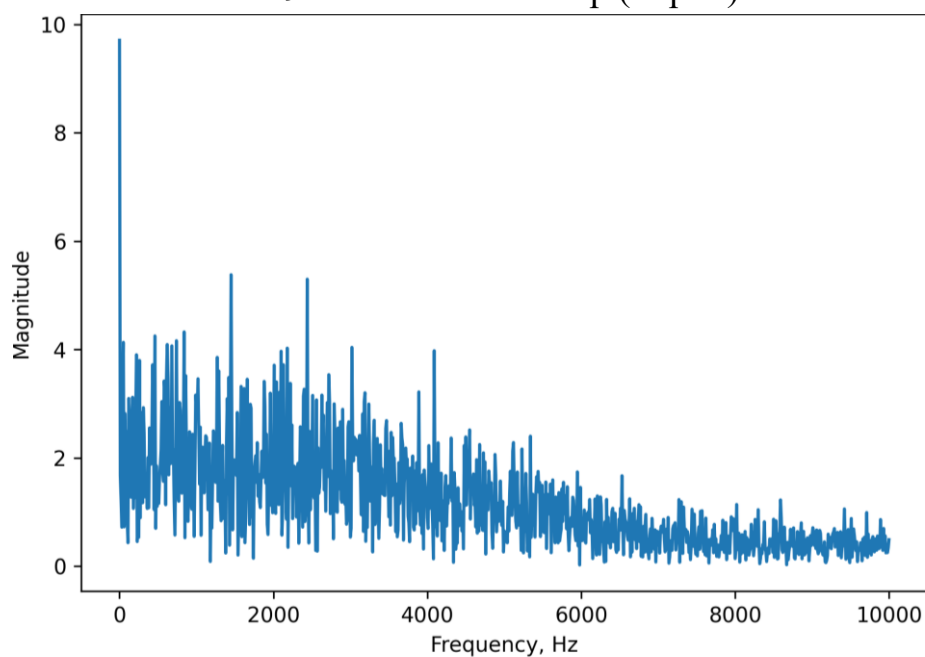


Рис.10. Частотный спектр (стресс)

Таблица 3. Численные результаты эксперимента

Состояние	N_c , 1/с	$\bar{P}$	$A_{\max}$	S
Нормальное	3	0,35	0,04	0,42
Умеренный стресс	12	1,10	0,18	1,25

Выраженный стресс	28	2,85	0,32	2,73
----------------------	----	------	------	------

Выводы. Разработано автоматическое устройство определения стрессового состояния растений на основе акустической эмиссии с использованием микрофона CMA-4544PF-W и микроконтроллера Arduino. Экспериментально подтверждена возможность ранней диагностики стрессовых воздействий. Предложенный метод отличается неинвазивностью, простотой реализации и перспективностью применения в системах интеллектуального сельского хозяйства.

Список литературы:

1. Jackson M.B. *Plant Stress Physiology*. Academic Press, 2019.
2. Mishra A. et al. Acoustic emission signals during plant stress. *Plant Methods*, 2020.
3. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of FFT. *Mathematics of Computation*, 1965.
4. CMA-4544PF-W Datasheet. CUI Devices.
5. Arduino UNO Technical Reference, 2023.
6. Кульчин Ю. Н., Шабанов Г. А., Рыбченко А. А., Кожанов С. О., Субботин Е. П. Низкочастотный акустический отклик растений на абиотический стресс. **Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук**, № 6, 2024, с. 18-27.
7. Биоэлектрическая реакция клеток высших растений к стресс-воздействиям. Статья в журнале “Омский научный вестник” (2011).
8. Shchennikova A. V., Filyushin M. A., Kochieva E. Z. *Stress memory in plants: key aspects (обзор)*.
9. **Сельскохозяйственная биология (Agricultural Biology)**, 2025, том 60, № 3, с. 397-414.