

# Разработка емкостного сенсора для детектирования примесей в воде

Н. В. Желвакова

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

talia\_zhelvakova@mail.ru

И. Л. Шейнман

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ishejnman@yandex.ru

**Аннотация.** Разработан емкостной сенсор, чувствительный к влиянию примесей на диэлектрическую проницаемость жидкостей. Исследованы частотные зависимости емкости сенсора, заполненного дистиллированной водой, талой водой и водой с добавлением адсорбентов. На низких частотах влияние примесей на емкость выражено незначительно. На частотах выше 100 кГц наблюдалось уменьшение емкости, наиболее выраженное снижение наблюдалось у дистиллированной воды, причем на частотах, значительно более низких, чем в известных опубликованных результатах. Наличие и дальнейшее повышение концентрации примесей ослабляло эффект, смещая градиент в область более высоких частот.

**Ключевые слова:** емкостной сенсор, электроемкость, диэлектрическая проницаемость, жидкость, диэлектрическая проницаемость жидкости, цилиндрический конденсатор

## I. ВВЕДЕНИЕ

Изучение электрических свойств жидкостей является традиционной областью интереса экспериментальной физики материалов [1]. Измеряются и анализируются емкость, импеданс, сопротивление, диэлектрическая проницаемость, проводимость. Эти характеристики используют во многих отраслях промышленности для контроля состава и свойств жидких веществ. В частности, перспективным направлением является мониторинг компонентов сточной и питьевой воды. В случаях, когда примесь не диссоциирует на ионы, практически не оказывая влияния на проводимость, и не может быть зафиксирована кондуктометром (III группа примесей по классификации акад. Л. А. Кульского) [2], целесообразно использование емкостного сенсора. На основе измеренных значений емкости делаются выводы о физико-химических свойствах жидкости [3-6]. Емкостные сенсоры также применяются для контроля давления и уровня жидких веществ.

Емкость является комплексным параметром, который зависит как от свойств исследуемой жидкости, так и от геометрических размеров и формы прибора. При фиксированных геометрических размерах и форме сенсора электроемкость определяется диэлектрической проницаемостью жидкости. На измеренное прибором значение емкости также могут оказывать влияние электропроводность и электрогальванический эффект.

Для определения диэлектрической проницаемости жидкостей используют различного рода конденсаторы, где в качестве диэлектрика выступает исследуемая

жидкость. Различные варианты конструкции, характеристик, работы и возможные применения устройства представлены в [3], [4].

Настоящая работа направлена на разработку емкостного сенсора с целью исследования влияния примесей на диэлектрические свойства жидкостей.

## II. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе производится сопоставление электрической емкости цилиндрического конденсатора, заполненного исследуемой жидкостью, с емкостью пустого конденсатора. Емкость конденсатора находится с помощью измерителя иммитанса МНИПИ Е7-20 в частотном диапазоне 25 Гц – 1 МГц.

Одной из ключевых проблем при измерении емкости является проводимость водных растворов, приводящая к возникновению электрогальванического эффекта в исследуемом конденсаторе. В связи с этим в качестве внешней обкладки цилиндрического конденсатора длиной 57 см использована медная трубка радиусом 4,4 мм, а в качестве внутренней – медный трансформаторный провод радиусом 1,25 мм, покрытый заводской изоляцией из лака толщиной 0,05 мм. Внутренний стержень центрирован относительно внешней обкладки с помощью пластиковых вкладышей.

Емкость цилиндрического конденсатора с однородным заполнением определяется по формуле

$$C = 2\pi l \epsilon_0 \epsilon / \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Изгиб внутреннего провода приводит к изменению емкости конденсатора. Ее учет основан на методе зеркальных изображений [7] (рис. 1), который приводит к следующему выражению для емкости:

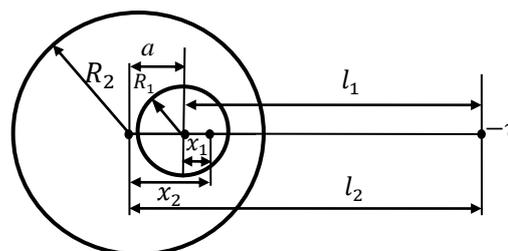


Рис. 1. Метод зеркальных изображений для некоаксиального цилиндрического конденсатора

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\left( \ln \frac{R_2 - x_2}{R_1 - x_1} - \ln \frac{l_2 - R_2}{l_1 - R_1} \right)},$$

где  $l$  – длина конденсатора,  $R_2$  – радиус внешней обкладки,  $R_1$  – радиус внутренней обкладки без изоляции,

$$x_2 = \frac{a^2 + R_2^2 - R_1^2 - \sqrt{(a^2 + R_2^2 - R_1^2)^2 - 4a^2 R_2^2}}{2a},$$

$x_1 = x_2 - a$ ,  $l_1 = R_1^2/x_1$ ,  $l_2 = R_2^2/x_2$ ,  $a$  – смещение внутреннего стержня от оси внешней обкладки.

На рис. 2 представлена зависимость относительной погрешности емкости конденсатора от смещения центрального электрода относительно оси внешнего цилиндра. В серии проведенных экспериментов было обеспечено максимальное отклонение стержня от оси 0,5 мм, что соответствует относительной погрешности определения емкости не более 5%. Кроме того, измерения емкости конденсатора без жидкости и с жидкостью проводились по возможности последовательно без промежуточной корректировки формы центрального электрода, что обеспечивало взаимную компенсацию искажения емкости конденсатора при нахождении диэлектрической проницаемости. Как следствие, можно считать, что относительная погрешность при нахождении диэлектрической проницаемости не превышала 1%.

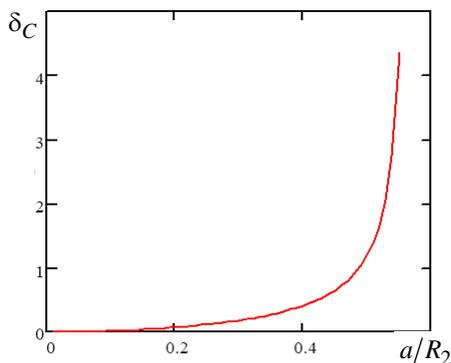


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности определения емкости конденсатора от смещения центрального электрода

На измеряемую с помощью измерителя иммитанса емкость может оказывать влияние индуктивность конденсатора, который представляет собой коаксиальный цилиндр. Емкость с учетом влияния индуктивности:

$$C_L = \frac{1}{1/C_{изм} + \omega^2 L},$$

где  $C_{изм}$  – измеренная емкость,  $L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{R_2}{R_1} \right)$ .

На рис. 3 приведена частотная зависимость истинной емкости конденсатора без и с учетом влияния его индуктивности. При этом для оценки степени влияния измеряемая емкость принята неизменной. Из рисунка

видно, что влияние становится существенным лишь на частотах порядка 10 МГц и выше. В рабочем диапазоне частот использованного измерителя иммитанса максимальная относительная погрешность влияния индуктивности конденсатора на измерение его емкости составляет  $2,2 \cdot 10^{-4}$  на частоте 1 МГц, и, следовательно, пренебрежимо мала.

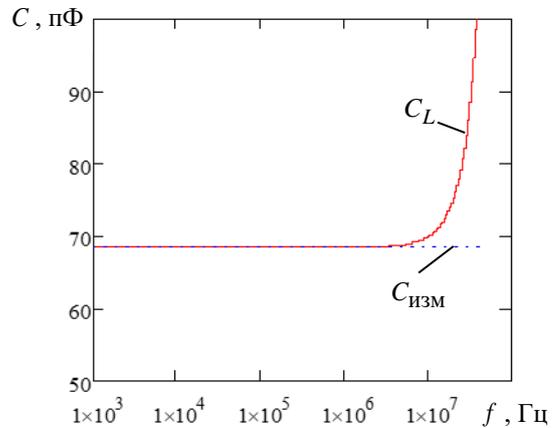


Рис. 3. Частотная зависимость влияния индуктивности конденсатора на емкость

Существенным фактором, влияющим на точность измерений, является емкость изоляции внутреннего провода. Изоляцию внутреннего провода и промежутки между обкладками можно представить в качестве двух конденсаторов, соединенных последовательно. Тогда емкость всего конденсатора составит:  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ , где

$$C_1 = 2\pi l \epsilon_0 \epsilon_n \ln \frac{R_n}{R_1}, \quad C_2 = 2\pi l \epsilon_0 \epsilon \ln \frac{R_2}{R_n}, \quad \epsilon_n \approx 3$$

– диэлектрическая проницаемость изоляции,  $R_n$  – радиус внутреннего стержня с изоляцией.

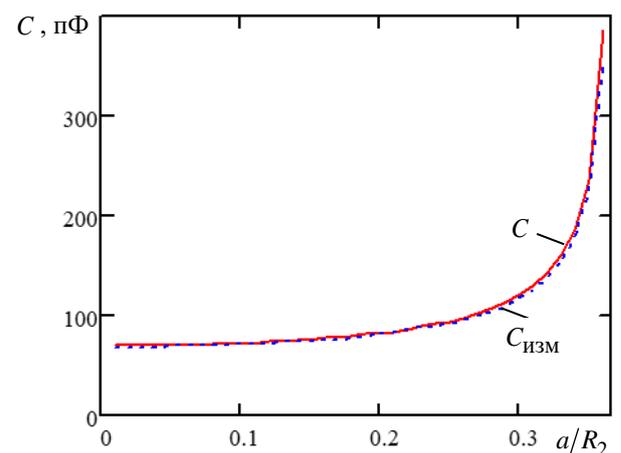


Рис. 4. Зависимость измеренной емкости пустого конденсатора без учета и с учетом изоляции внутреннего электрода от сдвига внутреннего электрода относительно оси внешнего

Учет емкости изоляции приводит к относительному изменению емкости пустого конденсатора на 1,7% (рис. 4), а конденсатора с жидкостью на 58% (рис. 5), что делает использование упрощенной формулы для нахождения диэлектрической проницаемости  $\epsilon = C_{ж}/C_{в}$  неприменимым.

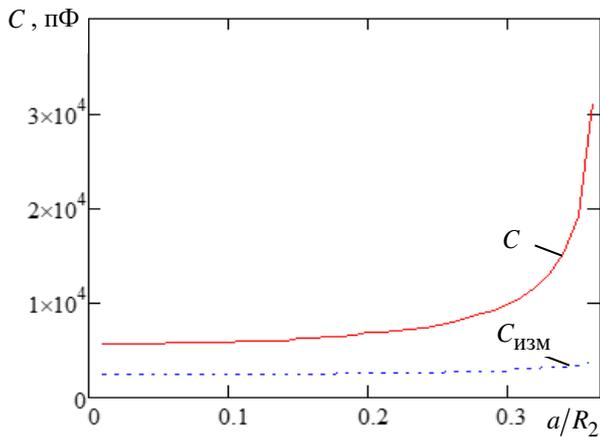


Рис. 5. Зависимость измеренной емкости конденсатора с жидкостью без учета и с учетом изоляции внутреннего электрода от сдвига внутреннего электрода относительно оси внешнего

Для нахождения диэлектрической проницаемости жидкости возможно использование уточненной формулы

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{в}}} \frac{C_1 - C_{\text{в}}}{C_1 - C_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{в}}$  – емкость пустого конденсатора,  $C_{\text{ж}}$  – емкость конденсатора с жидкостью.

Для дальнейшего анализа будем использовать эффективную диэлектрическую проницаемость, определяемую формулой:  $\varepsilon_{\text{эфф}} = C_{\text{ж}}/C_{\text{в}}$ , где  $C_{\text{ж}}$  – емкость конденсатора с жидкостью,  $C_{\text{в}}$  – емкость пустого конденсатора ( $\varepsilon = 1$ ). Следует отметить, что эффективная диэлектрическая проницаемость заполнения конденсатора, введенная таким образом, включает в себя влияние диэлектрической проницаемости лака, изолирующего внутреннюю обкладку конденсатора, и отличается от истинной диэлектрической проницаемости жидкости. Отдельно диэлектрическая проницаемость жидкости  $\varepsilon$  не определялась ввиду значительной погрешности ее определения по формуле (1).

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Были проведены измерения частотных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости заполнения конденсатора с водой разной степени очистки. В [8] приведено указание на влияние направления изменения температуры на диэлектрическую проницаемость воды. Причем отмечалось, что диэлектрическая проницаемость отличается у воды в процессах понижения и повышения температуры, а также после прохождения процесса таяния. В связи с этим были исследованы диэлектрические свойства воды с разным содержанием примесей при температуре, близкой к 0 °С.

Из полученных графиков (рис. 6) видно, что с повышением частоты наблюдается спадание эффективной диэлектрической проницаемости. При этом наиболее низкая частота, начиная с которой происходит снижение эффективной диэлектрической проницаемости, у конденсатора с дистиллированной

водой, далее с дистиллированной охлажденной, со снегом и, затем, с водопроводной водой. По мере перехода к охлажденной дистиллированной воде, растаявшему чистому снегу и, далее, к водопроводной воде, частота, начиная с которой происходит снижение эффективной диэлектрической проницаемости, повышается.

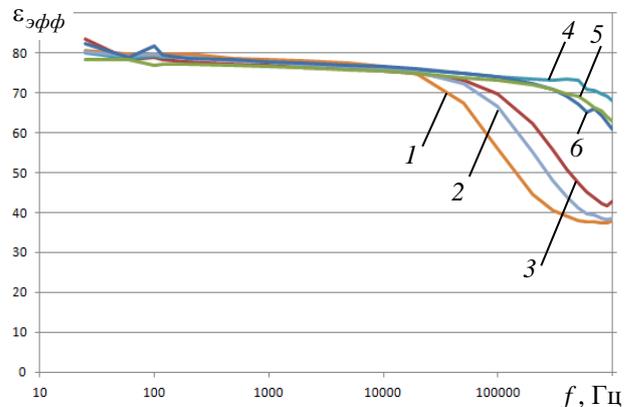


Рис. 6. Частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости конденсатора с талой водой

- 1 – талая дистиллированная вода;
- 2 – охлажденная дистиллированная вода при температуре, близкой к 0 °С;
- 3 – талый снег, отобранный на подоконнике;
- 4 – талый снег, отобранный у дороги;
- 5 – талая водопроводная вода;
- 6 – талая водопроводная вода при температуре 20 °С

Существенная разница в значениях эффективной диэлектрической проницаемости сенсора с талым снегом, отобранного у дороги и на подоконнике, показывает, что определяющим во влиянии на эффективную диэлектрическую проницаемость является наличие или отсутствие примесей. Чем меньше концентрация примесей, тем ниже пороговая частота, начиная с которой происходит снижение эффективной диэлектрической проницаемости конденсатора с водой. Относительно большие и близкие друг к другу значения эффективной диэлектрической проницаемости на высоких частотах у конденсатора с талой водопроводной водой при температуре, близкой к 0 °С, и при температуре 20 °С позволяют сделать вывод об определяющем влиянии примесей в качестве причины подъема  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ , а не изменения температуры в этом диапазоне.

Одновременно со снижением пороговой частоты при уменьшении концентрации примесей происходит уменьшение абсолютных значений эффективной диэлектрической проницаемости на высоких частотах  $10^5 - 10^6$  Гц. При частотах, близких к 1 МГц, эффективная диэлектрическая проницаемость начинает повышаться и имеется тенденция к возникновению минимума (кривые 1, 2, 3) эффективной диэлектрической проницаемости. При этом четко минимум прослеживается только у талой дистиллированной воды и талого снега, на остальных же его положение находится на частотах, превышающих максимальную частоту измерения на использованном приборе (1 МГц).

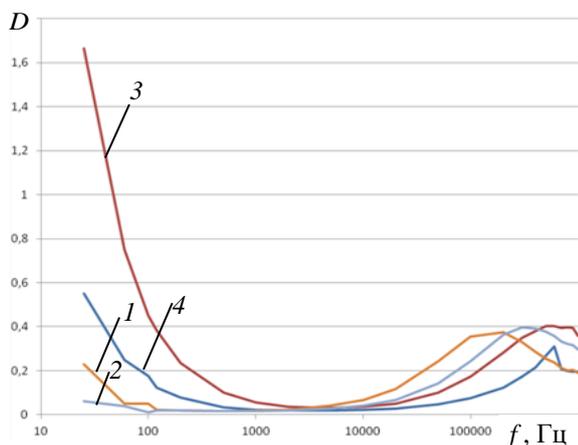


Рис. 7. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для конденсатора с талой водой  
 1 – талая дистиллированная вода;  
 2 – охлажденная дистиллированная вода при температуре, близкой к 0 °С;  
 3 – талый снег, отобранный на подоконнике;  
 4 – талый снег, отобранный у дороги

Из сравнения графиков для тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 7) видно, что графики имеют минимум в зоне средних частот (1–10 кГц), а с ростом частоты наблюдается локальный максимум, положение которого чуть ниже положения соответствующего минимума эффективной диэлектрической проницаемости. На высоких частотах наименьшее значение эффективной диэлектрической проницаемости соответствует наибольшему значению тангенса дельта на низких частотах. Чем ниже эффективная диэлектрическая проницаемость на высоких частотах и пороговая частота спада, тем на более низких частотах наблюдается положение максимума тангенса угла диэлектрических потерь.

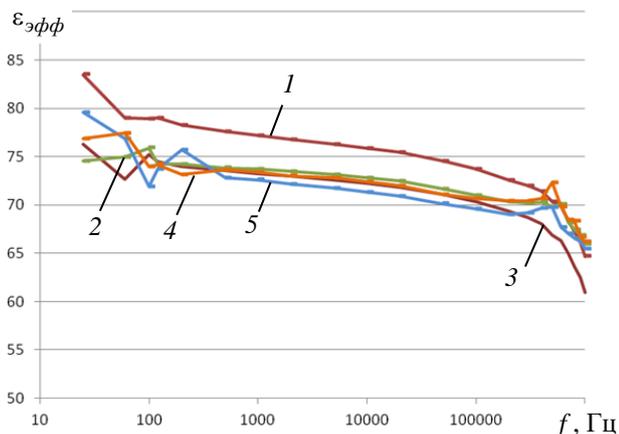


Рис. 8. Частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости конденсатора с водой с добавлением адсорбентов.  
 1 – вода с добавлением шунгита (отстаивание 10 мин),  
 2 – вода с добавлением шунгита (отстаивание 4 дня),  
 3 – водопроводная вода,  
 4 – вода с добавлением смектита,  
 5 – вода с добавлением активированного угля

Был проведен сравнительный анализ эффективной диэлектрической проницаемости конденсатора с водопроводной водой и водой с добавлением адсорбентов: шунгита, активированного угля и

диоктаэдрического смектита (рис. 8). Частотные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости для всех тестируемых жидкостей носят сходный характер, незначительно отличаясь лишь абсолютным значением. Локального минимума эффективной диэлектрической проницаемости не наблюдается, но заметно локальное повышение на частотах 500–600 кГц для воды с добавлением адсорбентов (шунгита, диоктаэдрического смектита и активированного угля). Относительно большие значения эффективной диэлектрической проницаемости сенсора с водой с добавлением шунгита при малом времени отстаивания (10 мин.) объясняются низкой степенью очистки используемого адсорбента и увеличением количества примесей в жидкости.

Сравнивая графики для тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 9), можно сказать, что графики имеют минимум в зоне средних частот (1–10 кГц), а с ростом частоты наблюдается локальный максимум, положение которого находится на частотах 800–900 кГц, но не коррелированно с минимумом эффективной диэлектрической проницаемости. Так же, как и в случае с талой водой, на высоких частотах наименьшее значение эффективной диэлектрической проницаемости соответствует наибольшему значению тангенса дельта на низких частотах.

При уменьшении концентрации примесей в водопроводной воде при помощи добавления адсорбентов происходит уменьшение абсолютных значений эффективной диэлектрической проницаемости на высоких частотах  $10^5 - 10^6$  Гц.

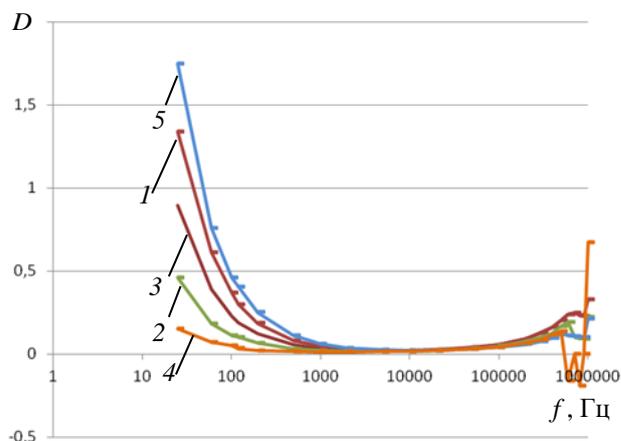


Рис. 9. Частотная зависимость для тангенса угла диэлектрических потерь для конденсатора с водой с добавлением адсорбентов  
 1 – вода с добавлением шунгита (отстаивание 10 мин),  
 2 – вода с добавлением шунгита (отстаивание 4 дня),  
 3 – водопроводная вода,  
 4 – вода с добавлением смектита,  
 5 – вода с добавлением активированного угля

#### IV. ВЫВОДЫ

Разработан емкостной сенсор, позволяющий детектировать примеси в жидкости. Для него был проведен учет факторов, порождающих возможные систематические погрешности определения емкости. Анализ частотных зависимостей эффективной диэлектрической проницаемости разных растворов показал, что на частотах выше 100 кГц наблюдалось снижение эффективной диэлектрической

проницаемости. Наиболее выраженный спад наблюдался у конденсатора с дистиллированной водой, причем на частотах, значительно более низких, чем в известных опубликованных результатах [9]. Установлено, что на высоких частотах (более 500 кГц) емкость конденсатора сильно зависит от наличия и концентрации примесей в заполняющей его жидкости, причем, чем выше концентрация, тем менее выражено спадание эффективной диэлектрической проницаемости на высоких частотах. Добавление адсорбентов изменяет эффективную диэлектрическую проницаемость незначительно. Однако использование недостаточно очищенного адсорбента приводит к существенному изменению эффективной диэлектрической проницаемости. Анализ емкости конденсатора с талой и охлажденной водой показал, что определяющим во влиянии на емкость является не процесс таяния или изменение температуры в небольшом диапазоне 0–20 °С, а наличие или отсутствие примесей.

Разработанный емкостной сенсор может быть использован для целей экологического мониторинга и детектирования наличия в жидкостях примесей III группы по классификации Л. А. Кульского, когда данный вид примеси не диссоциирует на ионы и не может быть зафиксирован кондуктометром.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность М. Ю. Панкратовой, А. И. Дедык и В. А. Агабабаеву за поддержку при выполнении работы, идеи и ценные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии, Казань: КГУ, 2008. 112 с.
- [2] Очистка муниципальных сточных вод с повторным использованием воды и обработанных осадков: теория и практика / Н.И. Куликов, А.Н. Ножевникова, Г.М. Зубов [и др.]; под общ. ред. Н.И. Куликова, А.Н. Ножевниковой. М.: Логос, 2020. 400 с.
- [3] Anaraki P.A. Study of liquid mixtures electrical properties as a function of electrical conductivity using capacitive sensor // Res. J. Applied Sci. Eng. Technol, 25: 439-446, 2014
- [4] Ahn H.J., Kim I.H. and Han D.C. Nonlinear analysis of cylindrical capacitive sensor. Meas. Sci. Technol. 16: 699-706. 2005
- [5] Behzadi G., Golnabi H. Comparison of invasive and non-invasive cylindrical capacitive sensors for electrical measurements of different water solutions and mixtures // Sensors and Actuators A: Physical, Volume 167, Issue 2. Pages 359-366 (2011).
- [6] Jócsák I., Végvári G., Vozáry E. Electrical impedance measurement on plants: a review with some insights to other fields // Theor. Exp. Plant Physiol, Volume 31, pages 359–375, 2019
- [7] Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 3-х томах. Том 3. 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
- [8] Xu Xiangtian & Zhang Weidong & Wang Yongtao. (2022). Measuring and modeling the dielectric constant of soil during freezing and thawing processes: an application on silty clay // Acta Geotechnica. 17. 1-20. 10.1007/s11440-022-01487-8.
- [9] Troiano Amedeo & Pasero Eros & Mesin Luca. (2010). An innovative water and ice detection system for monitoring road and runway surfaces // 6th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, PRIME 2010. 1-4.