

УДК: 699.88. 539.23  
OECD: 2.01IM

## Разработка комбинированной защиты от шума и ЭМИ

Иванов Н.И.<sup>1</sup>, Ершов С.В.<sup>2\*</sup>, Храпко Н.Н.<sup>3</sup>, Патрушева Т.Н.<sup>4</sup>  
<sup>1,4</sup>Д.н.т., профессор, <sup>2</sup>магистрант, <sup>3</sup>старший преподаватель  
<sup>1,2,3,4</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Расположение жилых домов вблизи объектов, являющихся источниками, повышенных уровней шума и электромагнитного излучения негативно сказывается на здоровье населения. Целью исследования является разработка конструкции окна, обладающего повышенными звукоизоляционными свойствами, а также способностью экранировать электромагнитное излучение промышленной частоты. В работе использовались результаты исследований процессов и явлений, влияющих на звукоизоляцию окон, а также изучены предложенные методики расчётов электромагнитного излучения и экранирующей эффективности различных материалов. В качестве объекта защиты выбраны жилые помещения, расположенные ближе всего к крупнейшим в России электрическим подстанциям. По результатам работы предложена оптимальная конструкция оконного блока, способного обеспечить безопасность в жилых помещениях. Установлено, что минимальная звукоизоляция составляет 36 дБ, снижение электромагнитного излучения составило 41 дБ.

**Ключевые слова:** шум, электромагнитное излучение промышленной частоты, экранирование, звукоизоляция, трансформаторная подстанция, ИТО покрытие

## *Development of combined protection against noise and electromagnetic radiation*

Ivanov N.I.<sup>1</sup>, Ershov S.V.<sup>2\*</sup>, Khrapko N.N.<sup>3</sup>, Patrusheva T.N.<sup>4</sup>  
<sup>1,4</sup>D.Sc., Professor, <sup>2</sup>Master student, <sup>3</sup>Lecturer  
<sup>1,2,3,4</sup>Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

### Abstract

The location of residential buildings near objects that are sources of increased noise and electromagnetic radiation has a negative impact on public health. The aim of the study is to develop a window design with improved soundproofing properties and the ability to shield industrial frequency electromagnetic radiation. The work used the results of studies of processes and phenomena that affect window soundproofing, and also studied the proposed methods for calculating electromagnetic radiation and the shielding efficiency of various materials. Residential premises located closest to the largest transformer substations in Russia were selected as the object of protection. Based on the results of the work, an optimal design of a window block was proposed that can ensure safety in standardized premises. It was found that the minimum soundproofing is 36 dB, the reduction in electromagnetic radiation was 41 dB.

**Keywords:** noise, electromagnetic radiation of industrial frequency, shielding, sound insulation, transformer substation, ITO coating

---

\*E-mail: sergey2600@bk.ru (Ершов С.В.)

## Введение

В современном мире человек часто подвергается воздействию вредных физических факторов. К ним относятся шум и электромагнитное излучение (ЭМИ). Разработаны и эффективно применяются различные методы борьбы отдельно с повышенными уровнями шума и ЭМИ. Однако нередко случается так, что человек живет в условиях, когда на него одновременно воздействуют оба фактора. Объектами источниками повышенного уровня шума и ЭМИ являются трансформаторные подстанции (ТП). Источником шума на ТП являются сердечники силовых трансформаторов. Существующие способы защиты, такие как шумозащитные экраны и заземляющие контуры, снижают уровни шума и интенсивности ЭМИ вблизи источника излучения [1]. Стоимость возведения шумозащитного экрана на ТП, либо же применение шумозащитного кожуха для трансформатора является высокой. Если целью защитных мероприятий является защита небольших объектов, например, дачного посёлка или отдельно стоящих малоэтажных зданий, то применение шумозащитных экранов, кожухов, заземляющих контуров становится невыгодным. В данной работе предложена идея создания комбинированного способа защиты вблизи защищаемого объекта. Такой способ позволит обеспечивать норму шума и ЭМИ на отдельных защищаемых объектах, минимизируя затраты на защитные мероприятия.

Основным источником шума на ТП является активная часть трансформатора, а также вентиляционного оборудования на ТП [1]. Сердечник трансформатора набран из тонких пластин из электротехнической стали, которые под влиянием переменного магнитного потока, проходящего через них, вибрируют и соударяются, создавая низкочастотный шум. Низкочастотный шум хуже экранируется шумозащитным экраном, потому что низкочастотный шум легче дифрагирует через кромки экрана. Способ защиты от шума ТП с помощью шумозащитного остекления обладает большей эффективностью, так как он находится вблизи объекта защиты. Оконный блок закреплён в стеновом проеме, что исключает дифракцию звука за ограждение. Норма эквивалентного шума для жилых помещений составляет 40 дБА днем и 30 дБА ночью, норма максимального шума для жилых помещений составляет 55 дБА днем и 45 дБА ночью [2].

Электромагнитное излучение – это распространяющееся в пространстве изменяющееся электромагнитное поле (ЭМП), на ТП его источником являются все токоведущие части. Электромагнитное поле состоит из электрической и магнитной составляющей. Так как электрическая составляющая ЭМП быстро затухает с увеличением расстояния, то оценивать будем только магнитную составляющую [3]. Магнитная составляющая ЭМП в помещении нормируется по напряженности магнитного поля (А/м), норма для помещений составляет 4 А/м [2]. Методом защиты от ЭМП является покрытие индия-олова (ИТО), нанесенное на прозрачную стеклянную подложку.

## 1 Расчёт звукоизолирующей способности оконного блока

Идея комбинированного способа защиты заключается в разработке оконного блока, обладающего повышенными звукоизоляционными свойствами, способного экранировать электромагнитные поля. Проведен расчёт эффективности нескольких вариантов конструкции оконного блока, для определения оптимального соотношения размеров и расположения элементов конструкции, с целью создания шумозащитного оконного блока, обладающего наибольшей эффективностью при наименьшей толщине. Расчёты звукоизолирующей способности конструкций проводились согласно [4] и [5]. Расположение элементов рассмотренных конструкций представлено на рисунке 1.

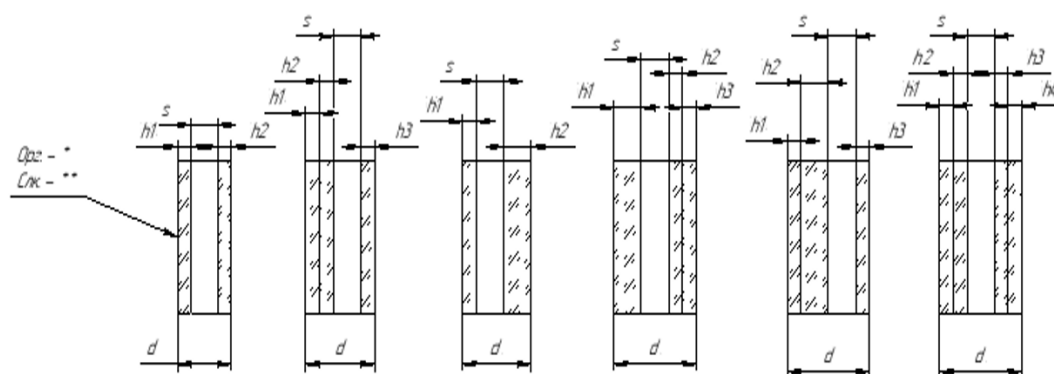


Рисунок 1 – Схемы расчётных конструкций

Сделаны расчёты звукоизолирующей способности шумозащитного остекления в зависимости от параметров:  $s$  – толщина воздушного промежутка, мм;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  – толщина первой, второй, третьей и четвертой пластины, соответственно, мм;  $d$  – общая толщина конструкции, мм. Материал остекления: органическое стекло – \*, силикатное стекло – \*\*. Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкций представлены в таблицах 1-6.

Таблица 1 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 1 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 1, формула остекления $h_1-s-h_2$ |                                  |    |    |    |            |
|-----------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|------------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм        | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |            |
|                                               | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |            |
|                                               | $h_1$ , мм                       |    |    |    | $h_2$ , мм |
|                                               | 3                                | 5  | 8  | 10 |            |
| 5                                             | 28                               | 30 | 32 | 33 | 3          |
|                                               | 30                               | 30 | 32 | 33 | 5          |
|                                               | 32                               | 32 | 32 | 33 | 8          |
|                                               | 33                               | 33 | 33 | 33 | 10         |
| 10                                            | 32                               | 34 | 36 | 37 | 3          |
|                                               | 34                               | 34 | 36 | 37 | 5          |
|                                               | 36                               | 36 | 36 | 37 | 8          |
|                                               | 37                               | 37 | 37 | 37 | 10         |
| 15                                            | 34                               | 36 | 38 | 39 | 3          |
|                                               | 36                               | 36 | 38 | 39 | 5          |
|                                               | 38                               | 38 | 38 | 39 | 8          |
|                                               | 39                               | 39 | 39 | 39 | 10         |
| 20                                            | 35                               | 37 | 39 | 40 | 3          |
|                                               | 37                               | 37 | 39 | 40 | 5          |
|                                               | 39                               | 39 | 39 | 40 | 8          |
|                                               | 40                               | 40 | 40 | 40 | 10         |
| 30                                            | 38                               | 40 | 42 | 43 | 3          |
|                                               | 40                               | 40 | 42 | 43 | 5          |
|                                               | 42                               | 42 | 42 | 43 | 8          |
|                                               | 43                               | 43 | 43 | 43 | 10         |

Таблица 2 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 2 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 2, формула остекления $h1-h2-s-h3$ |                                  |    |    |    |           |
|------------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|-----------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм         | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |           |
|                                                | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |           |
|                                                | $h1-h2$ , мм                     |    |    |    | $h3$ , мм |
|                                                | 6                                | 10 | 16 | 20 |           |
| 5                                              | 34                               | 36 | 37 | 38 | 3         |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 5         |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 8         |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 10        |
| 10                                             | 38                               | 40 | 41 | 42 | 3         |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 5         |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 8         |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 10        |
| 15                                             | 40                               | 42 | 43 | 44 | 3         |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 5         |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 8         |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 10        |
| 20                                             | 41                               | 43 | 44 | 45 | 3         |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 5         |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 8         |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 10        |
| 30                                             | 44                               | 46 | 47 | 48 | 3         |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 5         |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 8         |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 10        |

Таблица 3 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 3 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 3, формула остекления $h1-s-h2$ |                                  |    |    |    |           |
|---------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|-----------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм      | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |           |
|                                             | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |           |
|                                             | $h1$ , мм                        |    |    |    | $h2$ , мм |
|                                             | 3                                | 5  | 8  | 10 |           |
| 5                                           | 31                               | 33 | 34 | 35 | 6         |
|                                             | 31                               | 33 | 34 | 35 | 10        |
|                                             | 31                               | 33 | 34 | 35 | 16        |
|                                             | 31                               | 33 | 34 | 35 | 20        |
| 10                                          | 35                               | 37 | 38 | 39 | 3         |
|                                             | 35                               | 37 | 38 | 39 | 5         |
|                                             | 35                               | 37 | 38 | 39 | 8         |
|                                             | 35                               | 37 | 38 | 39 | 10        |
| 15                                          | 37                               | 39 | 40 | 41 | 3         |
|                                             | 37                               | 39 | 40 | 41 | 5         |
|                                             | 37                               | 39 | 40 | 41 | 8         |
|                                             | 37                               | 39 | 40 | 41 | 10        |
| 20                                          | 38                               | 40 | 41 | 42 | 3         |
|                                             | 38                               | 40 | 41 | 42 | 5         |
|                                             | 38                               | 40 | 41 | 42 | 8         |
|                                             | 38                               | 40 | 41 | 42 | 10        |
| 30                                          | 41                               | 43 | 44 | 45 | 3         |
|                                             | 41                               | 43 | 44 | 45 | 5         |
|                                             | 41                               | 43 | 44 | 45 | 8         |
|                                             | 41                               | 43 | 44 | 45 | 10        |

Таблица 4 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 4 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 4, формула остекления $h1-s-h2-h3$ |                                  |    |    |    |               |
|------------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|---------------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм         | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |               |
|                                                | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |               |
|                                                | $h1$ , мм                        |    |    |    | $h2, h3$ , мм |
|                                                | 6                                | 10 | 16 | 20 |               |
| 5                                              | 34                               | 36 | 37 | 38 | 6             |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 10            |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 16            |
|                                                | 34                               | 36 | 37 | 38 | 20            |
| 10                                             | 38                               | 40 | 41 | 42 | 3             |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 5             |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 8             |
|                                                | 38                               | 40 | 41 | 42 | 10            |
| 15                                             | 40                               | 42 | 43 | 44 | 3             |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 5             |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 8             |
|                                                | 40                               | 42 | 43 | 44 | 10            |
| 20                                             | 41                               | 43 | 44 | 45 | 3             |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 5             |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 8             |
|                                                | 41                               | 43 | 44 | 45 | 10            |
| 30                                             | 44                               | 46 | 47 | 48 | 3             |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 5             |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 8             |
|                                                | 44                               | 46 | 47 | 48 | 10            |

Таблица 5 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 5 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 5, формула остекления $h1-h2-s-h3$ |                                  |    |    |    |           |
|------------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|-----------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм         | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |           |
|                                                | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |           |
|                                                | $h1, h2$ , мм                    |    |    |    | $h3$ , мм |
|                                                | 9                                | 13 | 19 | 23 |           |
| 5                                              | 36                               | 36 | 38 | 39 | 3         |
|                                                | 36                               | 36 | 38 | 39 | 5         |
|                                                | 36                               | 36 | 38 | 39 | 8         |
|                                                | 36                               | 36 | 38 | 39 | 10        |
| 10                                             | 40                               | 40 | 42 | 43 | 3         |
|                                                | 40                               | 40 | 42 | 43 | 5         |
|                                                | 40                               | 40 | 42 | 43 | 8         |
|                                                | 40                               | 40 | 42 | 43 | 10        |
| 15                                             | 42                               | 42 | 44 | 45 | 3         |
|                                                | 42                               | 42 | 44 | 45 | 5         |
|                                                | 42                               | 42 | 44 | 45 | 8         |
|                                                | 42                               | 42 | 44 | 45 | 10        |
| 20                                             | 43                               | 43 | 45 | 46 | 3         |
|                                                | 43                               | 43 | 45 | 46 | 5         |
|                                                | 43                               | 43 | 45 | 46 | 8         |
|                                                | 43                               | 43 | 45 | 46 | 10        |
| 30                                             | 46                               | 46 | 48 | 49 | 3         |
|                                                | 46                               | 46 | 48 | 49 | 5         |
|                                                | 46                               | 46 | 48 | 49 | 8         |
|                                                | 46                               | 46 | 48 | 49 | 10        |

Таблица 6 – Результаты расчёта звукоизолирующей способности конструкции 6 при различных параметрах  $s$ ,  $h$

| Конструкция 6, формула остекления h1-h2-s-h3-h4 |                                  |    |    |    |           |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|-----------|
| Толщина воздушного промежутка $s$ , мм          | Звукоизолирующая способность, дБ |    |    |    |           |
|                                                 | Толщины элементов конструкции    |    |    |    |           |
|                                                 | h1,h2, мм                        |    |    |    | h3,h4, мм |
|                                                 | 6                                | 10 | 16 | 20 |           |
| 5                                               | 37                               | 39 | 42 | 42 | 6         |
|                                                 | 39                               | 40 | 42 | 43 | 10        |
|                                                 | 42                               | 42 | 44 | 44 | 16        |
|                                                 | 42                               | 43 | 44 | 45 | 20        |
| 10                                              | 37                               | 39 | 43 | 43 | 6         |
|                                                 | 39                               | 41 | 43 | 44 | 10        |
|                                                 | 43                               | 43 | 44 | 46 | 16        |
|                                                 | 43                               | 44 | 46 | 46 | 20        |
| 15                                              | 38                               | 39 | 43 | 43 | 6         |
|                                                 | 39                               | 41 | 43 | 45 | 10        |
|                                                 | 43                               | 43 | 45 | 46 | 16        |
|                                                 | 43                               | 45 | 46 | 46 | 20        |
| 20                                              | 38                               | 40 | 43 | 43 | 6         |
|                                                 | 40                               | 42 | 43 | 46 | 10        |
|                                                 | 43                               | 43 | 46 | 47 | 16        |
|                                                 | 43                               | 46 | 47 | 47 | 20        |
| 30                                              | 38                               | 40 | 43 | 44 | 6         |
|                                                 | 40                               | 42 | 44 | 46 | 10        |
|                                                 | 43                               | 44 | 46 | 48 | 16        |
|                                                 | 44                               | 46 | 48 | 48 | 20        |

Исходя из результатов расчётов, выбрана конструкция оконного блока с формулой стеклопакета 5-5-10-5-5, общей толщиной 30 мм. Оконный блок представляет собой два триплекса (силикатное и органическое стекла толщиной 5 мм каждое) между которыми находится воздушный зазор шириной 10 мм. Стекла, входящие в состав триплекса, соединены ПВХ пленкой, либо прозрачным клеящим веществом (А-смола). На внутреннюю сторону одного из триплексов нанесено прозрачное проводящее покрытие ИТО с помощью экстракционно-пиролитического метода. Пространство между триплексами заполнено аргоном. В торцах воздушной камеры находится слой пористого материала – минеральной ваты. Вся конструкция крепится на стальную раму, электрически соединённую с заземляющим устройством. Конструкция описываемого оконного блока представлена на рисунке 2.

Снижение шума достигается за счет разного удельного акустического сопротивления стекла различной плотности. Также в результатах, полученных в работах, посвященных исследованию звукоизоляции плоских пластин [6] показано, что на прохождение звуковых сигналов влияют резонансные явления в элементах остекления. За счет того, что оконный блок собран из триплексов со стеклом различной плотности, разнятся значения собственных критических частот по частотному диапазону для каждого стекла, за счет чего общая звукоизоляция оконного блока будет выше. Частотная характеристика оконного блока с формулой стеклопакет 5-5-10-5-5 представлена на рисунке 3.

Минимальная звукоизоляция оконного блока составляет 36 дБ, таким образом, оконный блок соответствует классу «Б», согласно [7].

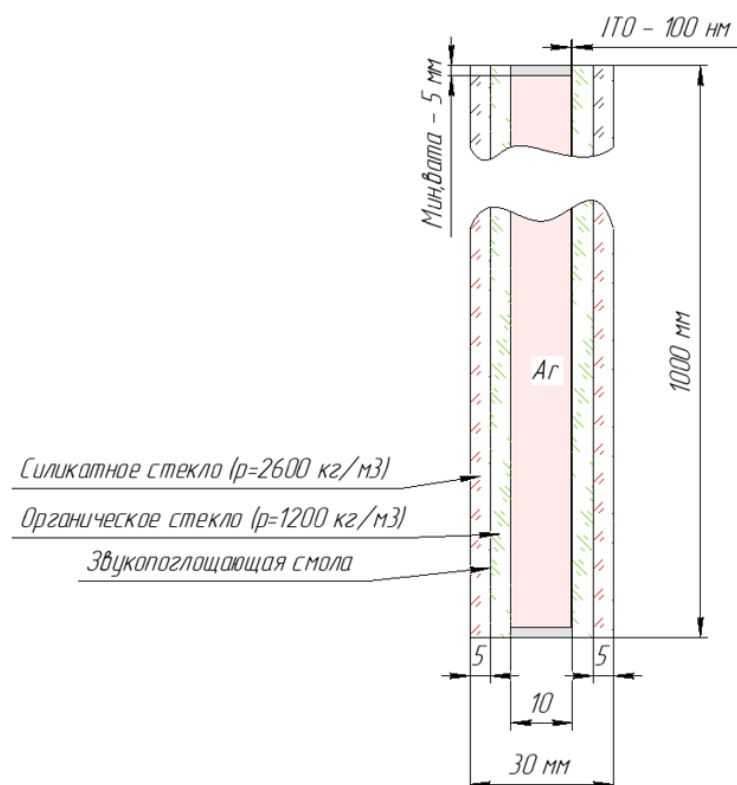


Рисунок 2 – Конструкция оконного блока

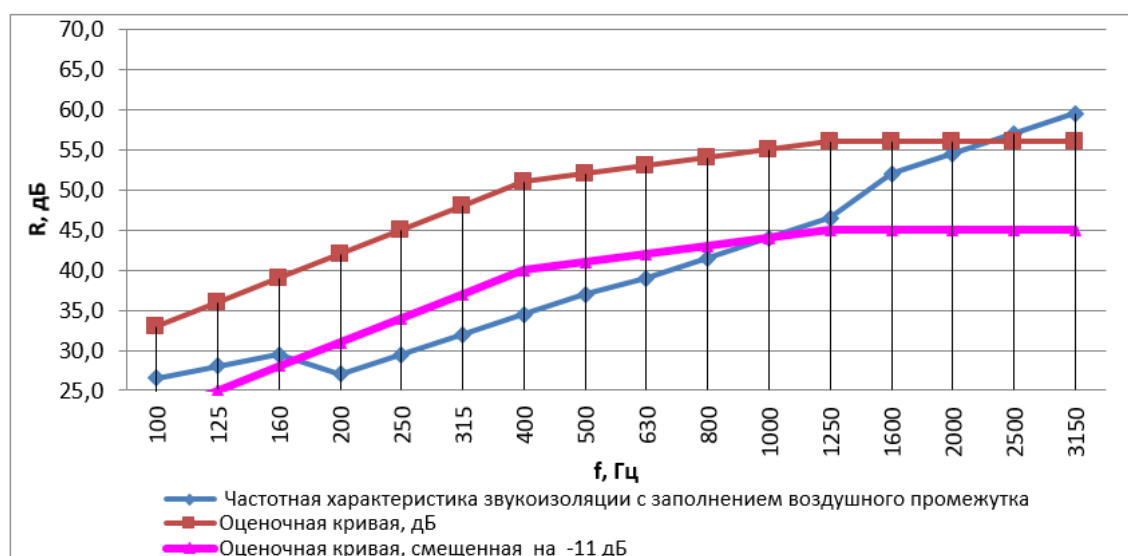


Рисунок 3 – Частотная характеристика оконного блока с формулой стеклопакета 5-5-10-5-5

## 2 Расчёт экранирующей способности предложенного оконного блока с ITO покрытием при защите от ЭМИ

Экранирующую эффективность ITO покрытия, нанесенного на внутреннее стекло оконного блока, оценим так же, как оценивается экранирующая эффективность тонким металлическим листом с известными параметрами: толщина ITO покрытия – 100-500 нм, удельное поверхностное сопротивление покрытия – 5 Ом\*м, относительная магнитная проницаемость покрытия – 1,01 Гн/м. Исследования экранирующих свойств ITO покрытия показаны в работах [8] и [9]. Расчёт эффективности экранирования ЭМИ

ITO покрытия выполнен по методике, предложенной в работе [3]. Результаты расчёта экранирующей эффективности ITO покрытием представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчёта экранирующей эффективности ITO покрытия

| №  | Наименование расчётной величины                        | Величина    | Ед. измерения  |
|----|--------------------------------------------------------|-------------|----------------|
| 1  | Глубина проникновения $d$ , м                          | 1,670230908 | м              |
| 2  | Волновое сопротивление $Z$ , Ом                        | 9,01914E-05 | Ом             |
| 3  | Удельное сопротивление материала экрана, Ом*м          | 0,000521    | Ом*м           |
| 4  | Длина волны ЭМП, м                                     | 5995849,16  | м              |
| 5  | Эквивалентный радиус экрана, м                         | 0,228409953 | м              |
| 6  | Толщина экрана, м                                      | 0,0000001   | м              |
| 7  | Относительная магнитная проницаемость материала экрана | 1,01        | Гн/м           |
| 8  | Частота, МГц                                           | 0,00005     | МГц            |
| 9  | Волновое сопротивление воздуха $Z_0$ , Ом              | 377         | Ом             |
| 10 | Длина помещения                                        | 6           | м              |
| 11 | Ширина помещения                                       | 4           | м              |
| 12 | Высота помещения                                       | 3           | м              |
| 13 | Объем помещения                                        | 72          | м <sup>3</sup> |
| 14 | Высота окна                                            | 1000        | мм             |
| 15 | Ширина окна                                            | 500         | мм             |
| 16 | Скорость света, м\с                                    | 299792458   | м\с            |
| 17 | Эффективность экранирования ITO                        | 159,8075455 | раз            |
| 18 | Эффективность экранирования ITO в дБ                   | 44,07194562 | дБ             |

График зависимости экранирующей эффективности покрытия от частоты ЭМИ представлен на рисунке 4.

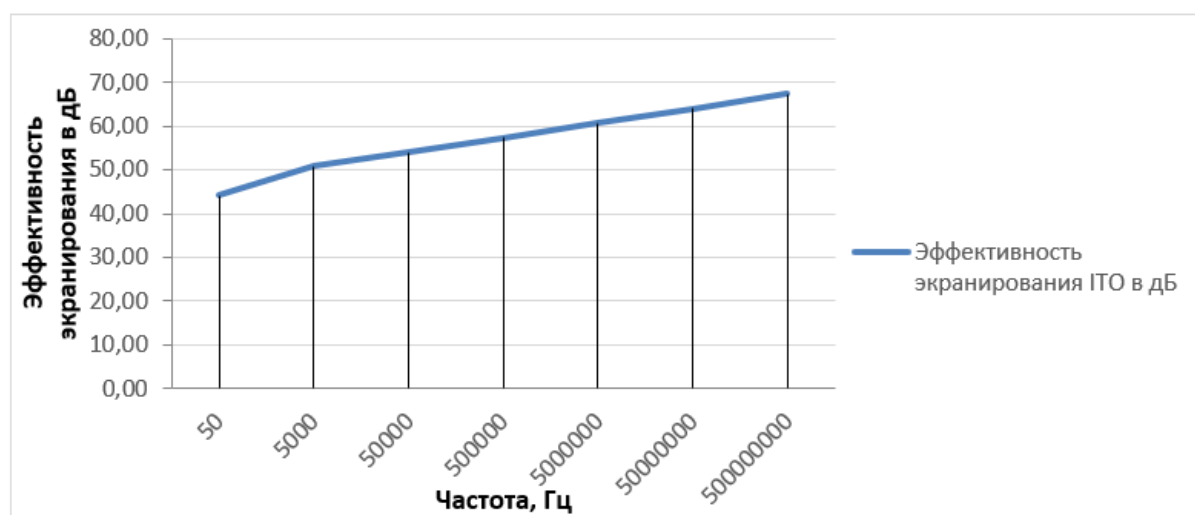


Рисунок 4 – График зависимости эффективности экранирования ITO покрытием в зависимости от частоты ЭМИ

Согласно результатам расчётов, полученная эффективность экранирования ЭМИ с помощью ITO покрытия составляет 44 дБ при условии, что покрытие нанесено равномерно и толщина покрытия составляет не менее 100 нм.



### 3 Влияние на общую звукоизоляцию конструкции при заполнении внутренней камеры Аргонем

Заполнение внутренней камеры стеклопакета Аргонем позволяет увеличить общую звукоизоляцию стеклопакета, за счет того, что звуковые волны хуже проходят через аргон, чем через воздух. Аргон обладает более вязкими свойствами в сравнении с воздухом, при комнатной температуре вязкость аргона составляет 2,1 мкПа\*с, а для воздуха 18,2 мкПа\*с. Общая звукоизоляция окна при заполнении воздушного промежутка аргонем изучалась в работе [10]. В данной работе испытывались различные стеклопакеты с заполнением воздушного промежутка различными газами, согласно исследованиям, звукоизоляция окон слабо зависит от вещества, заполняющего воздушный промежуток. Заполнение воздушного промежутка аргонем способно увеличить общую звукоизоляцию стеклопакета не более чем на 1 дБ. Перспективным методом является заполнение воздушных камер в стеклопакетах элегазом (гексафторидом серы), заполнением таким газом позволяет увеличивать звукоизоляцию стеклопакета в пределах 2-3 дБ согласно [10].

### 4 Результаты расчётов ЭМИ и шума в нормируемых помещениях при применении оконного блока конструкции 5-5-10-5-5 с ИТО покрытием на примере существующих ТП

Исследованы девять крупнейших электрических подстанций (ПС) России, расположенных вблизи малоэтажной жилой застройки. Выбраны различные ПС, расположенные в различных климатических зонах России от Юга до крайнего Севера. Пример исследованной ПС и расположение жилой застройки близ нее представлен на рисунке 5.

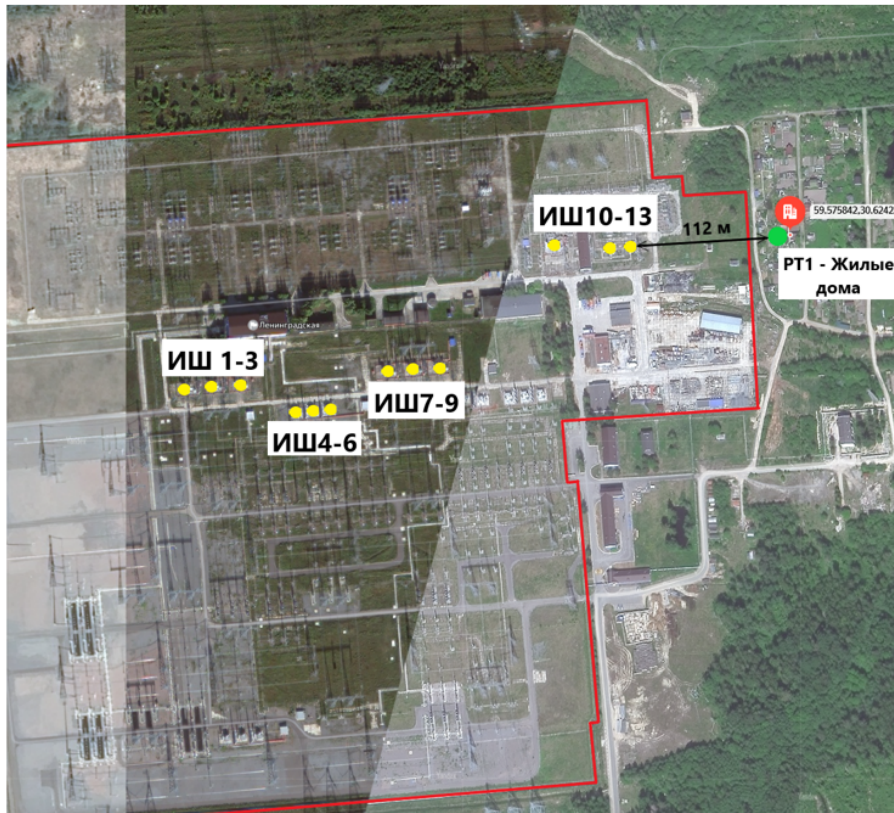


Рисунок 5 – Пример расположения исследованной ПС мощностью 750 кВ относительно объекта защиты

Расчёты шума и ЭМИ от ТП в ближайших номеруемых помещениях проведены согласно [11] и [12]. Исходные данные для ТП взяты согласно [13]-[15]. Также для расчётов ЭМИ использованы методы расчёта магнитной составляющей ЭМП согласно [13]. На рисунке 6 представлено сравнение уровней шума в помещении при использовании стандартного окна и разрабатываемого оконного блока конструкции 5-5-10-5-5.

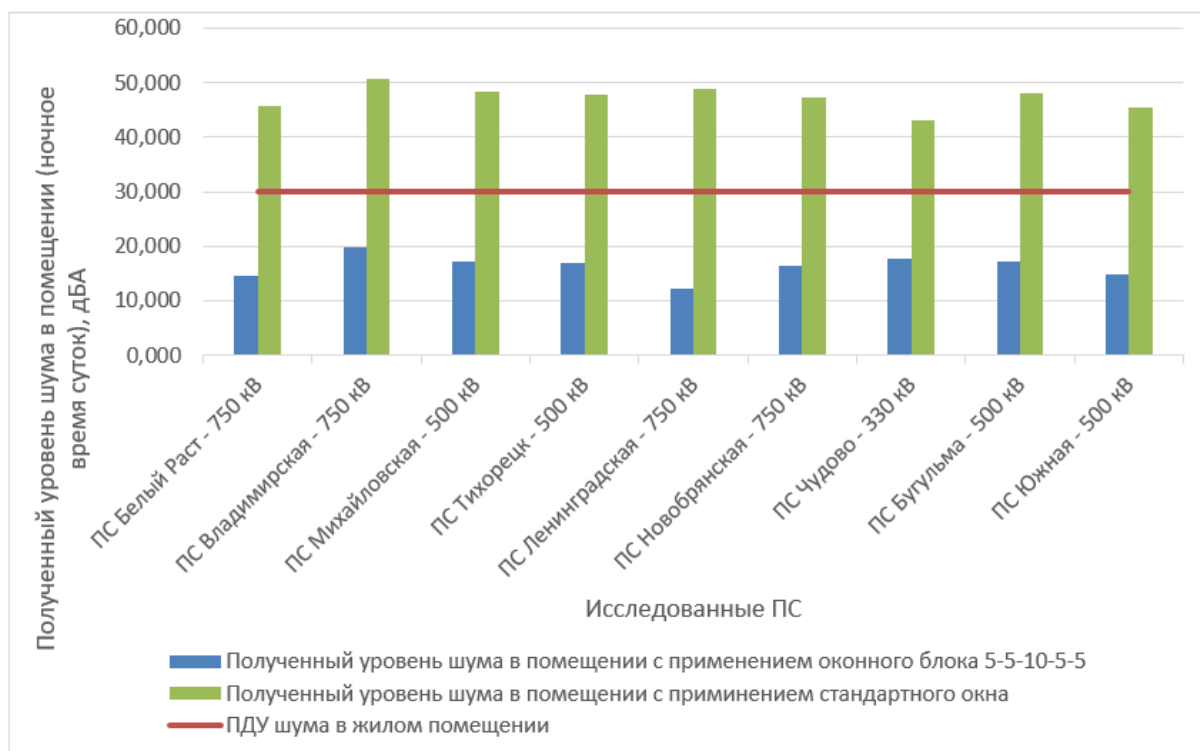


Рисунок 6 – Результаты расчёта уровней шума от ПС в помещении с применением оконного блока конструкции 5-5-10-5-5 и стандартного оконного блока в сравнении с нормой

Как видно по результатам расчётов оконного блока конструкции 5-5-10-5-5 достаточно для обеспечения нормы шума в помещениях возле каждой ПС. Наибольший уровень шума был зафиксирован на фасаде ближайшего жилого здания к подстанции Владимирская и составлял более 60 дБА, после применения предложенного оконного блока уровень шума в помещении составляет 30 дБА.

На рисунке 7 представлена диаграмма полученных напряженностей магнитного поля для ближайших к ПС нормируемых помещений с применением стандартного окна и оконного блока с нанесенным покрытием ИТО.

Как видно по результатам расчётов, ИТО покрытие способно полностью защитить от ЭМИ, исследованных ПС. А конструкция шумозащитного окна 5-5-10-5-5 является универсальной и позволяет соблюсти норму шума в помещениях при низкой толщине оконного блока 30 мм.

## 5 Расчёт себестоимости материалов

Себестоимость предложенного метода защиты складывается из стоимости каждого элемента остекления и стоимости получения оксидного покрытия. Указание размеров, объема материалов и стоимости приведено в таблице 8.

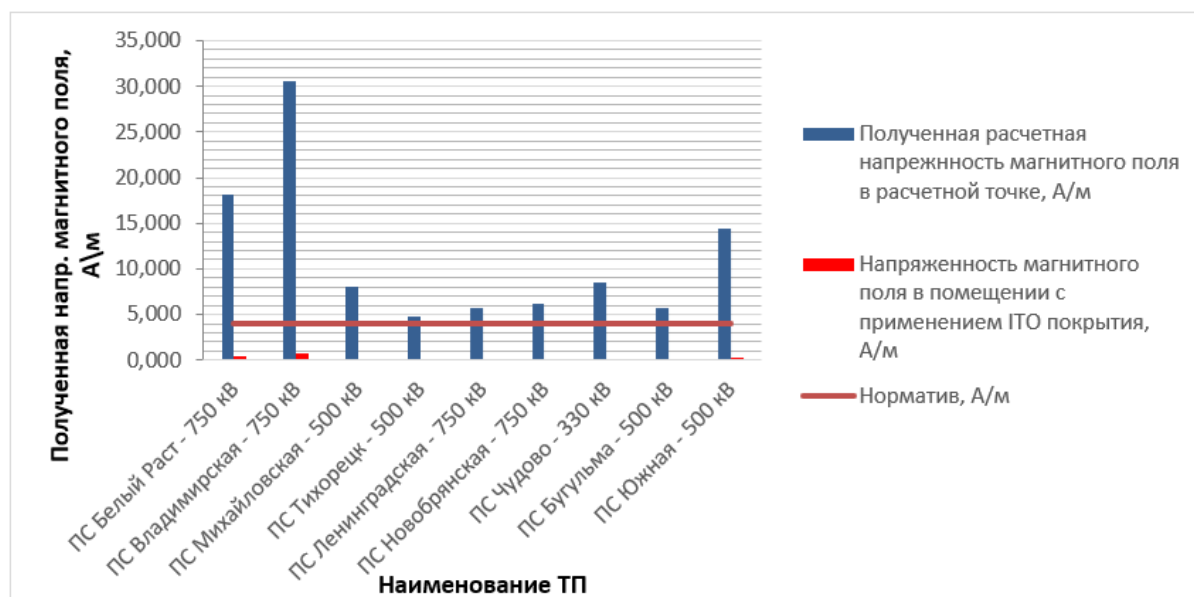


Рисунок 7 – Результаты расчёта напряженности магнитного поля в ближайших к ПС помещениях с применением стандартного окна и оконного блока конструкции 5-5-10-5-5 с нанесенным ИТО покрытием, в сравнении с нормой

Таблица 8 – Себестоимость шумозащитного оконного блока с нанесенным проводящим покрытием

| Наименование материала  | Размеры (длина*ширина*толщина), м, шт., объем. | Стоимость, руб | Примечание                                |
|-------------------------|------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|
| Оргстекло               | 500*1000*5                                     | 1500/лист      | Требуется 2 шт.                           |
| Силикатное стекло       | 500*1000*5                                     | 400/лист       | Требуется 2 шт.                           |
| Шумопоглощающая А-смола | 5 литров                                       | 400            | Цена за 25 литров 12200                   |
| Процесс ламинации       | -                                              | 500            | -                                         |
| Заполнение аргоном      | 5 литров                                       | 4,5            | Цена за 1 литр аргона 100 руб.            |
| Пленка ИТО              | 500*1000*0.0001                                | 300            | Стоимость материалов для получения пленки |
| Итого:                  | -                                              | 5904,5         | -                                         |

Указанный расчёт в таблице 8 является ориентировочным, реальная себестоимость изготовления 1 оконного блока такого типа будет выше.

## Заключение

В данной работе была предложена конструкция оконного блока для комбинированной защиты от ЭМИ и шума для жилых помещений, расположенных вблизи ПС. По результатам расчётов для нескольких вариантов конструкции оконного блока с различными толщинами и размерами элементов, установлено, что самым оптимальным вариантом является конструкция 5-5-10-5-5, общая звукоизоляция конструкции составляет 36 дБ. Также была выдвинута гипотеза о способности ИТО покрытия эффективно экранировать ЭМИ, согласно результатам расчётов, ИТО покрытие обладает способностью экранировать ЭМИ с эффективностью 41 дБ.

Для обоснования достаточности предложенного способа защиты были исследованы 10 объектов, являющихся одновременными источниками повышенного шума и ЭМИ. По результатам расчёта уровней шума и напряженности ЭМИ от 10 крупнейших ПС в России установлено, что оконный блок конструкции 5-5-10-5-5 с нанесённым ИТО

покрытием может эффективно применяться для обеспечения безопасного пребывания людей в рассматриваемых помещениях. Себестоимость материалов оконного блока составляет 5904,5 рублей. Вместе с оконным блоком также необходимо предусмотреть клапаны проветривания исходя из необходимого воздухообмена в помещении.

### Список использованных источников

1. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. Ленинград: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1989. – 360 с.
2. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/A6S0N5> (дата обращения 12.03.2025).
3. Санатова Т.С., Хакимжанов Т.Е. Охрана труда и основы безопасности жизнедеятельности. Защита от воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона. Методические указания и задания к расчётно-графической работе для студентов специалистов 5В071900. - Алматы: АИЭС, 2010. - 33 с.
4. СП 275.1325800.2016 Конструкции, ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050583> (дата обращения 12.03.2025).
5. СП 23-103-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035210> (дата обращения 12.03.2025).
6. Кирпичников В.Ю., Дроздова Л.Ф., Ляпунов Д.В., Кудяев А.В. Выявление причин снижения звукоизоляции окон // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т. 16, N 1. - С. 1891-1897.
7. ГОСТ 23166-2024 Блоки оконные и балконные. Общие технические условия // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305402755/titles/7E60KG> (дата обращения 10.03.2025).
8. Комплексная защита от электромагнитных излучений. Экранирующие материалы // Излучениянет : [Электронный ресурс]. - <https://izlucheniya.ru/> (дата обращения 17.07.2025)
9. Kim Y., Kim N., Lee S.H., [и др.] Improved shielding from ultra-high frequency electromagnetic interference with controlled width of nano-branches of ITO using various types of tin materials // Nanoscale. - 2023. - N 15. - P. 13635-13644. - DOI: 10.1039/D3NR03153E.
10. Акустические характеристики светопрозрачных конструкций // Вашдом : [Электронный ресурс]. - URL: [https://www.vashdom.ru/articles/tybet\\_shum.htm](https://www.vashdom.ru/articles/tybet_shum.htm) (дата обращения 15.04.2025)
11. СП 254.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от производственного шума // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139959> (дата обращения 10.03.2025).
12. Осипов Г.Л., Коробков В.Е., Климухин А.А. [и др.] Защита от шума в градостроительстве (Справочник проектировщика). - М.: Стройиздат, 1993. - 96 с.
13. РОССЕТИ (ПАО «Россети») // Россети : [Электронный ресурс]. - URL: <https://energybase.ru/distribution/rosseti> (дата обращения 15.04.2025)
14. ГОСТ 12.2.024-87 Шум. Трансформаторы силовые масляные. Нормы и методы контроля // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012013> (дата обращения 10.03.2025).

15. ГОСТ 17544-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ // КонсорциумКодекс : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006952> (дата обращения 10.03.2025).

## References

1. Aleksandrov, G. N. Ultra-high voltage installations and environmental protection / G. N. Aleksandrov. Leningrad: ENERGOATOMIZDAT, 1989. - 360 p.
2. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/A6S0N5> (date of access 12.03.2025).
3. Sanatova T. S., Khakimzhanov T. E. Occupational safety and fundamentals of life safety. Protection from exposure to electromagnetic fields of the radio frequency range. Guidelines and assignments for calculation and graphic work for students of specialists 5B071900. - Almaty: AIES, 2010. - 33 p.
4. SP 275.1325800.2016 Structures enclosing residential and public buildings. Soundproofing design rules // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/456050583> (date of access 12.03.2025).
5. SP 23-103-2003 Code of rules for design and construction. Soundproofing design of enclosing structures of residential and public buildings // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035210> (date of access 12.03.2025).
6. Kirpichnikov V.Yu., Drozdova L.F., Lyapunov D.V., Kudayev A.V. Identifying the causes of decreased window sound insulation // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2014. - Vol. 16, N 1. - P. 1891-1897.
7. GOST 23166-2024 Window and balcony blocks. General specifications // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305402755/titles/7E60KG> (date of access 10.03.2025).
8. Comprehensive protection against electromagnetic radiation. Shielding materials // Izlucheniyanet: [Electronic resource]. - URL: <https://izlucheniya.ru/> (date of access 07.17.2025).
9. Kim Y., Kim N., Lee S.H., [et al.] Improved shielding from ultra-high frequency electromagnetic interference with controlled width of nano-branches of ITO using various types of tin materials // Nanoscale. - 2023.15. - P. 13635-13644. - DOI: 10.1039/D3NR03153E.
10. Acoustic characteristics of translucent structures // Vashdom: [Electronic resource]. - URL: [https://www.vashdom.ru/articles/tybet\\_shum.htm](https://www.vashdom.ru/articles/tybet_shum.htm) (date of reference 15.04.2025).
11. SP 254.1325800.2016 Buildings and Territories. Design Rules for Industrial Noise Protection // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139959> (date of reference 10.03.2025).
12. Osipov G.L., Korobkov V.E., Klimuhin A.A. [et al.] Zashchita ot shuma v gradostroitel'stve (Spravochnik proektirovshchika). - M.: Strojizdat, 1993. - 96 p.
13. ROSSETI (PJSC Rosseti) // Rosseti: [Electronic resource]. - URL: <https://energybase.ru/distribution/rosseti> (date of reference 15.04.2025).
14. GOST 12.2.024-87 Noise. Oil power transformers. Standards and control METHODS // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012013> (date of reference 10.03.2025).
15. GOST 17544-85 General-purpose oil-immersed power transformers of voltage classes 220, 330, 500, and 750 kV // ConsortiumCode: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006952> (date of reference 10.03.2025).