

УДК 621.383.51:621.317.7

ЗНАЧЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ PID (POTENTIAL INDUCED DEGRADATION)

М.Х. Муродов¹, С.М. Барайшук², Э.Х. Беркинов¹, М.Я. Набиев¹, Т.У. Атамирзаев¹¹Наманганский государственный технический университет,²Белорусский Государственный аграрный технический университет

(Получена 20.11.2025 г.)

Annotatsiya. Ushbu maqolada fotoelektrik tizimlarda PID (Potential Induced Degradation) effekti mexanizmi va uning quyosh panellari samaradorligiga ta'siri o'rganilgan. Zaminlash tizimining elektr potentsialni barqarorlashtirishdagi roli, tuproqning solishtirma qarshiligini (ρ) kamaytirish usullari, jumladan gidrogel-grafit aralashmalaridan foydalanish samarasi tahlil qilingan. Namangan sharoitida Wenner usuli asosida o'lchov natijalari keltirilib, amaliy hisoblashlar yordamida 4 Ω talabi uchun zarur elektrodlar soni aniqlangan. Tadqiqot natijalari PID effekti xavfini kamaytirish va fotoelektrik tizimlarning uzoq muddatli barqarorligini ta'minlashda tuproq modifikatsiyasi muhimligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: PID-effekti, zaminlash, tuproq qarshiligi, gidrogel-grafit aralashma, Wenner usuli, fotoelektrik tizimlar.

Аннотация. В статье исследуется механизм возникновения эффекта PID (Potential Induced Degradation) в фотоэлектрических системах и его влияние на эффективность солнечных модулей. Рассмотрена роль системы заземления в стабилизации электрического потенциала и повышении надежности оборудования. Проанализированы методы снижения удельного сопротивления грунта, включая использование гидрогелево-графитовых смесей. На примере условий Намангана приведены результаты измерений по методу Веннера и выполнены расчёты необходимого количества электродов для достижения сопротивления 4 Ом. Полученные результаты показывают, что модификация грунта существенно снижает риск PID и повышает долговечность фотоэлектрических установок.

Ключевые слова: эффект PID, заземление, сопротивление грунта, гидрогелево-графитовая смесь, метод Веннера, фотоэлектрические системы.

Abstract. This paper investigates the mechanism of Potential Induced Degradation (PID) in photovoltaic systems and its impact on the long-term performance of solar panels. The role of grounding in stabilizing electrical potential and improving system safety is analyzed, emphasizing soil resistivity reduction techniques using hydrogel-graphite mixtures. Field measurements conducted in Namangan using the Wenner method were applied to calculate the number of grounding electrodes required to achieve a target resistance of 4 Ω . The results demonstrate that soil modification significantly reduces PID risks and enhances the reliability of photovoltaic installations under dry soil conditions.

Keywords: Potential Induced Degradation (PID), grounding, soil resistivity, hydrogel-graphite mixture, Wenner method, photovoltaic systems.

В последние десятилетия фотоэлектрическая энергия является одним из самых быстрорастущих и экономически привлекательных направлений среди возобновляемых ресурсов. Фотоэлектрические станции (ФЭС) большой мощности важны в национальных энергетических системах, и каждый из их компонентов – панели, инверторы, монтажные конструкции и системы заземления – напрямую влияет на эффективность всей системы.

Одним из важных факторов, снижающих долгосрочную эффективность солнечных панелей, является потенциальная индуцированная деградация (ПИД) – деградация, вызванная потенциалом. ПИД иногда может привести к снижению мощности модуля до 10-40%. В то же время, неправильная или недостаточно организованная система заземления также негативно влияет на безопасность и надежность эксплуатации. В данной статье подробно анализируется механизм ПИД, роль систем заземления, значение электропроводности грунта и практические рекомендации.

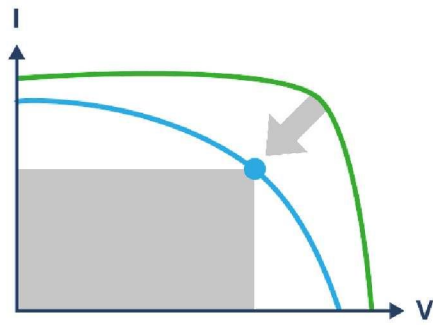


Рис. 1. Изменение ВАХ за счет ПИД.

Механизм PID: теория и практические признаки. ПИД – это процесс изменения электрических свойств модуля в результате диффузии и накопления ионов (особенно Na^+) через диэлектрический слой (ЭВС), стекло и полупроводниковые слои внутри модуля. Отдельные панели в электрической цепи имеют свой абсолютный потенциал, который может быть положительным или отрицательным по отношению к потенциалу Земли (0 В). Разность напряжений (например, ± 600 В или выше) приводит в движение ионы внутри диэлектрического слоя.

Накопление ионов приводит к следующим процессам:

- нарушение слоя пассивации;
- уменьшение шунтового сопротивления («leakage/bypass current» – увеличение тока утечки/обтекания);
- образование локальной «горячие точки» («hotspot») и появление черных пятен на инфракрасных изображениях;
- Ухудшение MPP (точка максимальной мощности) и ВАХ (рис. 1).

Методы определения PID в лабораторных и внешних условиях: электролюминесценция (ЭЛ), инфракрасное изображение (ИК), измерения MPP/ВАХ и исследования тока, напряжения по цепи. В модулях признаки PID часто усиливаются в элементах, близких к рамке (рис. 2).

Деградация PID

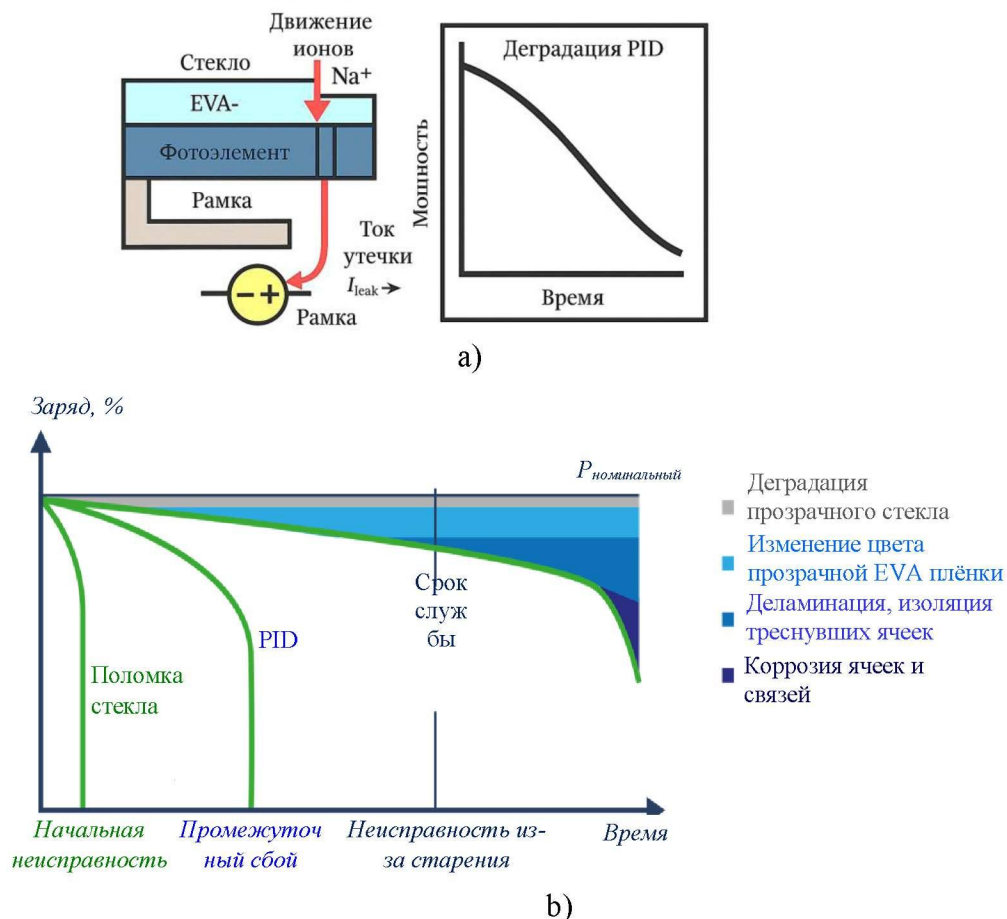


Рис. 2. Возникновение деградации ПИД в фотоэлектрических модулях и уменьшение мощности во времени (а) и причины деградации (б).

Грунтование и его влияние на ПИД. Две основные функции заземления: обеспечение электробезопасности и управление разностями потенциалов в системе. В случае ПИД заземление играет положительную роль, используя следующие методы:

1. Приближение потенциала к нулю – связывая электрод в модуле или цепи с землей, можно ограничить достижение его абсолютного потенциала опасных значений относительно земли.

2. Управление направлением движения ионов – заземление положительного или отрицательного электрода может уменьшить поток ионов внутри диэлектрика или перенаправить их в другое направление.

3. «Лечебные» процедуры – существуют эксперименты, в которых панели, деградировавшие из-за ПИД, могут быть частично восстановлены путем «перегрузки» с определенным потенциалом (например, +1000 В на панелях р-типа, -1000 В на панелях n-типа) или временным заземлением электродов.

На практике, когда такие компании, как SunPower, обнаружили проблему ПИД, наблюдались значительные улучшения путем улучшения изоляции панелей или подключения необходимого электрода к грунту. Однако типы заземления и топологии инверторов не всегда могут совпадать – в бестрансформаторных инверторах необходимо учитывать динамический характер потенциала.

Основным параметром, определяющим эффективность заземления, является проницаемость грунта (или его эквивалент – сопротивление грунта ρ , $\Omega \cdot m$). Свойства грунта зависят от: влажности, минерального состава, содержания солей, температуры и структуры.

Земная адаптация закона Ома – это специальное преобразование общей формы закона Ома для расчета электрического сопротивления в почвенной среде. То есть, по земле тоже течёт ток, но он распространяется вокруг, а не как по металлической проволоке, поэтому формула адаптирована. Следовательно, для обычного проводника сопротивление $R = \rho \cdot L / A$, но для заземляющих электродов традиционные формулы не используются. Потому что земля (грунт) – это не однородная металлическая проволока, а среда, состоящая из разных слоев с разной проводимостью. Поэтому закон Ома нельзя применять непосредственно. Однако, условно, тот же самый закон может быть использован в форме, адаптированной для земли.

Для расчетного сопротивления заземляющего электрода используется следующая формула:

$$R_{\text{электрод}} \approx \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$$

где: ρ – удельное сопротивление земли, L – длина электрода, d – диаметр электрода.

При параллельном расположении нескольких электродов общее сопротивление зависит от их взаимного положения и конструктивного взаимодействия – для максимальной эффективности рекомендуется, чтобы расстояние между электродами было примерно в 4-5 раз больше длины электрода.

Взаимное сопротивление – взаимные позиции и конструктивное взаимодействие электродов – это электрическое взаимодействие, возникающее между несколькими

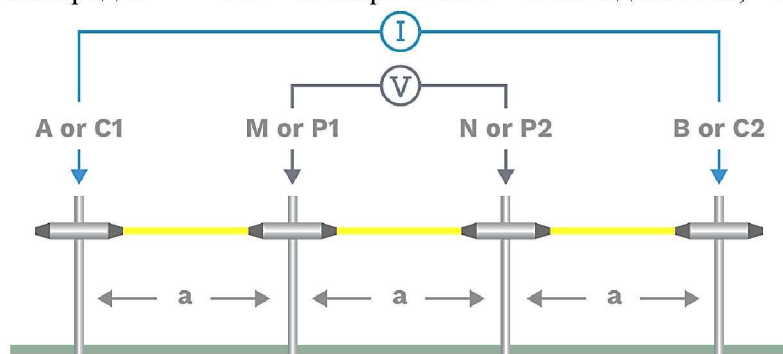


Рис. 3. Четырехэлектродный метод (Wenner) для определения сопротивления грунта.

электродами, введенными в грунт. Если в грунт ввести один электрод, то вокруг него образуется «зона грунтового тока», по которой течет ток. Этот поток тока распространяется цилиндрически.

Если несколько электродов расположить близко, то их зоны распространения тока перекрываются. Поэтому их общее сопротивление не

уменьшается мгновенно, как у обычного параллельного соединения, потому что поля тока между ними влияют друг на друга. Это можно объяснить тем, что «зона распространения» тока, протекающего в грунт вокруг каждого электрода, имеет форму круга или эллипса, а плотность тока уменьшается по мере удаления от электрода. Если два электрода расположить очень близко друг к другу, то их зоны распространения тока перекрываются и становятся общими. В результате их общая эффективность становится такой же, как у одного электрода – то есть, даже если мы добавим два электрода, сопротивление не уменьшится, как ожидалось. Это явление называется взаимным сопротивлением. Проще говоря: если мы поместим электроды слишком близко, они будут мешать друг другу, и их полезность уменьшится [1,2].

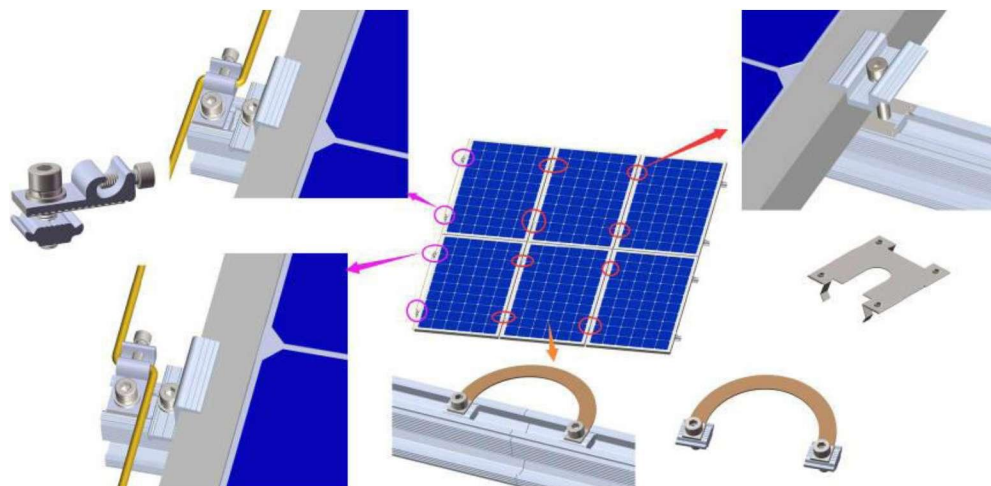


Рис. 5. Монтаж заземляющего проводника через специальные кронштейны на солнечные панели и металлические конструкции.

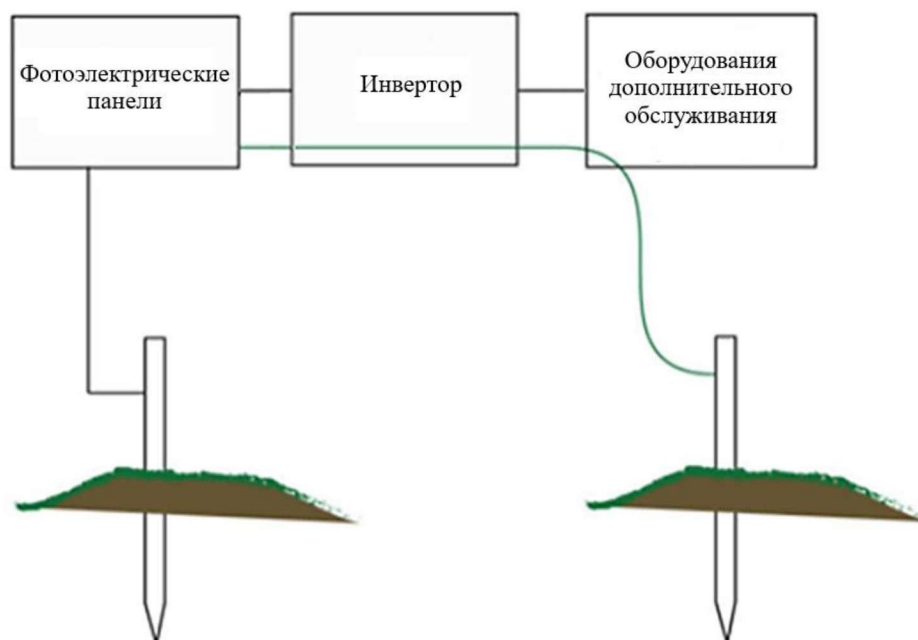


Рис. 6. Блок-схема заземления фотоэлектрической системы в грунт.

Измерение сопротивления грунта (методика Веннера) [3]. Наиболее часто используемый метод определения сопротивления грунта на площадке – четырехэлектродный метод (метод Веннера): четыре электрода (A, M, N, B) размещаются равномерно; проводимый ток подается через A-B, и измеряется разность потенциалов U между M-N.

Сопротивление грунта:

$$\rho = 2\pi a \cdot R_{Wenner} = 2\pi a \cdot \frac{U}{I}$$

где:

- a – расстояние между электродами, т.е. расстояние между каждым соседним электродом.
Например: если разместить 4 электрода и расстояние между ними равно 1 м, то $a = 1$ м. Если разместить 2 метра, то $a = 2$ м (рис. 3).
- ρ – удельное сопротивление грунта (Ом·м),
- a – расстояние между электродами (метры),
- U – измеренное напряжение (вольт),
- I – пропускаемый ток (ампер).

По полученному значению ρ принимается решение о проектировании системы заземления.

Методы улучшения заземления и свойств грунта (практические рекомендации).

Следующие практические меры рекомендуются для снижения эффективности заземления и, следовательно, риска ПИД:

1. Модификация грунта
 - Гидрогель-графитовые смеси: повышение проницаемости грунта (удержание влаги + создание проницаемого слоя) [4].
 - Солевые растворы и засоление: снижают сопротивление в короткие сроки, но необходимо учитывать коррозионные и экологические аспекты.
 - Угольный или графитовый порошок: может улучшить долгосрочную, безкоррозионную проводимость.
2. Электродные правила и материалы
 - Коррозионностойкие материалы (медь, покрытая медью, нержавеющая сталь); выбор диаметра и длины электрода в соответствии с проектом.
 - Комбинированная вертикальная + горизонтальная электродная сеть более эффективна в зависимости от геологического строения местности.
3. Топология заземления и инверторы
 - Гальваническая изоляция с трансформаторными инверторами может снизить риск ПИД.
 - В бестрансформаторной инверторной системе необходимо контролировать потенциал путем правильного выбора электродов и управления полюсами цепи.
4. Мониторинг и техническое обслуживание
 - Раннее выявление PID посредством регулярных проверок электролюминесценции (EL)/инфракрасной термографии (IR) и измерений MPP.
 - Сезонные измерения резистивности грунта (в сухой и влажный периоды) и при необходимости ремодификация грунта.
 - Ежегодные проверки сопротивления заземления (с помощью омметра) и мониторинг коррозии контактов.

Практические расчеты и технические расчеты по типовому проекту.

Первым шагом для проектной площадки является определение сопротивления грунта в 3-5 точках по методике Веннера. На основе полученного значения ρ рассчитывается необходимая длина и количество одиночного электрода или массива электродов.

Если $\rho > 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{м}$ (сухое песчаное поле), применение проницаемой смеси (графит/гидрогель) является обязательным. Если $\rho < 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (влажная глинистая или засоленная), может быть достаточно и меньшего количества обычных водородных электродов [5].

Для обеспечения независимой работы электродов рекомендуется расстояние между ними $L_{\text{электрод}} \times 4$ ($L_{\text{электрод}}$ – длина электрода).

Рассмотрим технические параметры заземляющей установки для фотоэлектрической станции с гибридным инвертором мощностью 10 кВт, установленной и запущенной в августе (!) этого года в Наманганском районе Наманганской области. Станция состоит из 10 поликристаллических кремниевых фотоэлектрических панелей мощностью 580 Вт каждая, 4 гелевых аккумуляторов емкостью 200 А·ч и инвертора мощностью 10 кВт. С учетом влияния ПИД-эффекта в системе был смонтирован заземляющий проводник через кронштейны с соединением солнечных панелей и крепящихся к ним металлических конструкций (рис. 5).

Фотоэлектрическая система, состоящая из фотоэлектрических панелей на крыше объекта, инвертора и соответствующего дополнительного обслуживающего оборудования, заземлена в грунт через электроды (рис. 6).

Расчеты были выполнены на основе приведенной выше основной формулы:

$$R_{\text{электрод}} \approx \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$$

Здесь:

ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;

L – длина заземляющего электрода, м;

d – диаметр электрода, м.

Для условий г. Намангана по результатам измерений были приняты следующие параметры:

$\rho = 200$ Ом·м, $L = 2,44$ м, $d = 0,016$ м.

В результате расчета сопротивление одного вертикального электрода было определено как $R_1 = 70,62 \Omega$.

Если предположить, что n электродов соединены параллельно, их общее сопротивление определяется следующим образом:

$$R_n \approx R_1 / n$$

Таким образом, рассчитанные значения для различного числа электродов следующие:

$n = 1 \rightarrow R = 70,62$ Ом.

$n = 3 \rightarrow R = 23,54 \Omega$.

$n = 5 \rightarrow R = 14,12 \Omega$.

$n = 10 \rightarrow R = 7,06$ Ом.

$n = 18 \rightarrow R \approx 3,92$ Ом.

Из результата видно, что для требования 4Ω требуется не менее 18 электродов длиной 2.44 м.

Результаты и обсуждение.

Поскольку удельное сопротивление грунта в условиях Намангана составляет в среднем около 200 Ω ·м, этот фактор необходимо учитывать при проектировании системы заземления. Для достижения требуемого сопротивления 4Ω рекомендуется использовать 18 вертикальных электродов длиной 2.44 м или 12-15 более длинных электродов (3.0-4.0 м). Применение гидрогель-графитовых смесей повышает устойчивость системы. В практических проектах фактическое сопротивление грунта должно измеряться методом Веннера. Эти расчеты должны быть приняты в качестве исходной технической оценки и усовершенствованы на основе данных измерений повторных экспериментов для окончательного проектирования.

Кроме того, применение модификаций, улучшающих поверхность контакта с землей – гидрогель-графитового наполнителя (hydrogel-graphite filler) или увлажняющих смесей повышает эффективность. В этом случае проницаемость грунта увеличивается, а общее сопротивление уменьшается до 30-50%. В ходе наших исследований мы будем представлять результаты экспериментов и расчетов по улучшению проницаемости грунта гидрогельными смесями.

Закключение.

Долгосрочная, стабильная и безопасная эксплуатация солнечных панелей напрямую зависит от качества системы заземления. Эффект PID остается реальной и экономически невыгодной проблемой для современных фотоэлектрических систем. Как указано выше, заземление может уменьшить влияние PID – но это только один компонент: модульные материалы (PID-free технологии), инверторные топологии и модификация грунта должны использоваться вместе для эффективного решения.

Практически рекомендуемый порядок: измерение сопротивления грунта по площади, проектирование заземляющих электродов (электродов, сетей), при необходимости модификация грунта (гидрогель/графит или соль), установка заземляющего устройства и измерения, мониторинг (EL/IR и электрические измерения). Эти этапы помогут снизить риск ПИД и поддерживать оптимальный срок службы фотоэлектрической станции и выработку энергии.

Список литературы

- [1]. Glen A. Mazur, In Cooperation with Fluke Corporation. Principles of Earth Grounding Resistance 1st Edition. © 2014. ISBN: 978-0-8269-1436-1
- [2]. W. Keith Switzer. Practical Guide to Electrical Grounding. 1st Edition, ERICO Publication, 1999 y.
- [3]. Коппель М. Измерение удельного сопротивления грунта и определение сопротивления заземляющего электрода методом Веннера // Journal of Electrical Engineering. – 2017. – Т. 68, № 3. – С. 163-168.
- [4]. Baraishuk S. et al. The use of hydrogels in mixtures to reduce the transient resistance of the soil-grounding device //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 497. – С. 03001.
- [5]. Набиев М. Я. Проведение исследований технических характеристик заземляющих устройств на экспериментальной площадке //Механика и технология. – 2024. – Т. 4. – №. 17. – С. 201-207.

SANOAT KORXONALARIDA VA ELEKTR TIZIMLARDA ELEKTR ENERGIYASIDAN OQILONA FOYDALANISH VA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

M.B. Hudayarov¹, Sh.Sh. Fayziyev²

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Tel.: +998977330792(c),

e-mail: muzaffar_hb@mail.ru

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Tel.: +998913344545(c),

e-mail: sherikfayz@gmail.com

(Qabul qilindi 05.09.2025 y.)

Annotatsiya: Bugungi kundagi sanoat korxonalarida elektr energiya samaradorligini oshirish va undagi mavjud isrofgarchiliklarning oldini olish hammamizning muammoyimiz hisoblanadi. Yaqinda mamlakatimiz rahbari tomonidan energiya resurslaridan oqilona foydalanish va bu sohadagi muammolar ko'rib chiqildi. Korxona va binolarda elektr energiyasidan foydalanishda, elektr energiyani kamroq sarflash evaziga yaxshi natijalarga erishish ham samaradorlik oshirish hisoblanadi. Energiya samaradorligiga oid tushunchalar barcha sohalarda o'z aksini topgan bo'ib, bu maqolada ayrim sohalarda elektr energiyasidan tejamkorlik bilan foydalanish muammosi ko'riladi.

Kalit so'zlar: energiya sarfi, me'yor, individual, elektr energiyasi, seh normasi, sanoat korxonalari, energiya samaradorligi, mahsulot, texnologik jarayon, norma, solishtirma sarfi.

Аннотация: Повышение эффективности использования электроэнергии на современных промышленных предприятиях и предотвращение её потерь – задача для всех нас. Недавно глава государства рассмотрел вопросы рационального использования энергетических ресурсов и проблемы в этой области. В использовании электроэнергии на предприятиях и в зданиях достижение высоких результатов при меньшем её потреблении также считается повышением эффективности. Понятие энергоэффективности находит отражение во всех сферах, и в данной статье будет рассмотрена проблема экономного использования электроэнергии в некоторых сферах.

Ключевые слова: энергопотребление, норматив, индивидуальный, электроэнергия, цеховой норматив, промышленные предприятия, энергоэффективность, продукт, технологический процесс, норматив, удельный расход.