

УДК 621.31:628.97

Терентьев Павел Валерьевич

к.т.н., доцент кафедры «ПМФиВМ»

Нижегородский государственный агротехнологический университет

им. Флорентьева Л. Я.

Terentyev Pavel Valerievich

Абрамов Никита Викторович, магистрант

Нижегородский государственный агротехнологический университет

им. Флорентьева Л. Я.

Abramov Nikita Viktorovich

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВЕТОДИОДНОГО ФИТОСВЕТИЛЬНИКА

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE DEVIATIONS ON THE ELECTRICAL AND LIGHTING PARAMETERS OF LED PHYTO-LAMPS

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния отклонений питающего напряжения в диапазоне от 207 В до 253 В на технические характеристики светодиодного фитосветильника TL-PROM FITO 45 UN. В ходе работы получены регрессионные уравнения, описывающие зависимости тока, освещенности и коэффициента гармонических искажений (THDi) от уровня напряжения. Установлено, что, несмотря на стабилизацию активной мощности, наблюдается обратно пропорциональная зависимость освещенности от напряжения. Определен оптимальный диапазон рабочих напряжений, обеспечивающий минимальный уровень гармоник и приемлемые светотехнические показатели.

Abstract. This article presents the results of an experimental study examining the impact of supply voltage fluctuations in the range from 207 V to 253 V on the technical characteristics of the TL-PROM FITO 45 UN LED phytoluminaire. Regression equations were obtained describing the dependence of current, illuminance, and total harmonic distortion (THDi) on voltage. It was found that, despite active power stabilization, illuminance is inversely related to voltage. The optimal operating voltage range was determined, ensuring minimal harmonic distortion and acceptable lighting performance.

Ключевые слова: Светодиодный фитосветильник, качество электроэнергии, отклонение напряжения, гармонические искажения, освещенность, регрессионный анализ, энергоэффективность.

Keywords: LED grow light, power quality, voltage deviation, harmonic distortion, illumination, regression analysis, energy efficiency.

Введение

Светодиодное освещение является основой современной сити-фермерства и тепличного хозяйства. Светодиодные фитосветильники обеспечивают оптимальный спектр для фотосинтеза при значительно меньшем энергопотреблении по сравнению с натриевыми лампами. Однако эффективность и долговечность LED-систем напрямую зависят от качества питающей электрической сети [1-3].

Согласно ГОСТ 32144-2013, в системах электроснабжения общего назначения допускаются отклонения напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения (230 В) [4]. Несмотря на наличие в светильниках импульсных источников питания (ИИП), отклонения входного напряжения могут влиять на ток потребления, пульсации светового потока и уровень генерируемых в сеть высших гармоник [5]. Целью данной работы является количественная оценка влияния отклонений питающего напряжения на электрические и светотехнические параметры светодиодного фитосветильника TL-PROM FITO 45 UN.



Методика проведения эксперимента и оборудование

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой электрическую цепь, состоящую из источника регулируемого напряжения, исследуемого светильника и контрольно-измерительной аппаратуры.

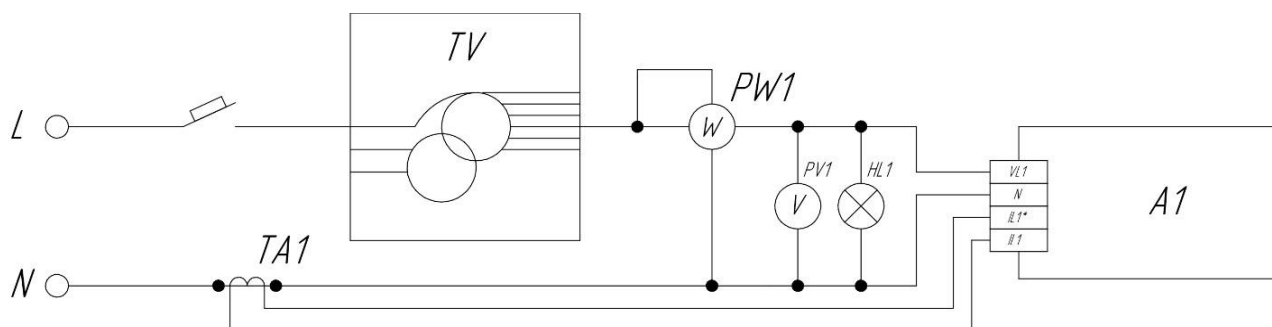


Рисунок 1. Структурная схема лабораторной установки

Напряжение питания изменялось в диапазоне от 207 В до 253 В с шагом 2 В. Регистрация параметров осуществлялась после выхода светильника на установившийся тепловой режим.

В составе измерительного комплекса использовались следующие приборы:

Анализатор качества электроэнергии Circutor AR6: Использовался для измерения действующих значений тока (I), активной (P), реактивной (Q) и полной (S) мощности, коэффициента мощности ($\cos\varphi$), а также для спектрального анализа тока (коэффициент суммарных гармонических искажений THDi и отдельные гармоники до 9-й).

Люксметр/пульсметр ТКА-ПКМ (08): Применялся для измерения освещенности (E) в горизонтальной плоскости на фиксированном расстоянии от светильника.

Цифровые клещи UT210E и мультиметр UNI-T UT39B: Использовались для верификации показаний тока и напряжения.

Результаты экспериментального исследования

В ходе эксперимента была получена матрица данных, отражающая изменение параметров светильника в зависимости от уровня питающего напряжения. Сводные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений электрических и светотехнических параметров

$U_{\text{пит}}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{квар}$	$S, \text{кВА}$	$S_{\text{расч}}, \text{кВА}$	$\cos\varphi$
207	0,23	0,05	0,01	0,051	45,54	0,99
209	0,227	0,05	0,01	0,051	45,4	0,99
211	0,225	0,05	0,01	0,051	45,45	0,99
213	0,222	0,05	0,01	0,051	45,288	0,99
215	0,221	0,05	0,01	0,051	45,526	0,99
217	0,218	0,05	0,01	0,051	45,344	0,99
219	0,216	0,05	0,01	0,051	45,36	0,99
221	0,214	0,05	0,01	0,051	45,368	0,99
223	0,213	0,05	0,01	0,051	45,582	0,99
225	0,21	0,05	0,01	0,051	45,36	0,99
227	0,208	0,05	0,01	0,051	45,344	0,99
229	0,206	0,05	0,01	0,051	45,32	0,99
231	0,204	0,05	0,01	0,051	45,288	0,99

233	0,203	0,05	0,01	0,051	45,472	0,99
235	0,201	0,05	0,01	0,051	45,426	0,99
237	0,198	0,05	0,01	0,051	45,144	0,99
239	0,197	0,05	0,01	0,051	45,31	0,99
241	0,197	0,05	0,01	0,051	45,704	0,99
243	0,195	0,05	0,01	0,051	45,63	0,99
245	0,193	0,05	0,01	0,051	45,548	0,99
247	0,191	0,05	0,01	0,051	45,458	0,99
249	0,19	0,05	0,01	0,051	45,6	0,99
251	0,189	0,05	0,01	0,051	45,74	0,99
253	0,189	0,05	0,01	0,051	45,738	0,99
U_{пит}, В	E, кЛк	THDi, %	НЗ%	Н5%	Н7%	Н9%
207	1,1	14,4	13,3	5,5	2,5	0
209	1,09	12,6	12,3	5,2	2,6	0
211	1,09	13,8	13,3	4,5	2,6	0
213	1,08	14,4	13,8	4,6	2,6	0
215	1,08	13,8	12,7	4,6	2,6	0
217	1,08	13,9	13,5	4,7	2,7	0
219	1,08	13,7	12,7	4,7	0	0
221	1,08	13,6	12,8	4,8	0	0
223	1,08	13,7	13,3	4,8	0	0
225	1,07	13,6	13,2	4,9	0	0
227	1,07	13,7	12,7	4,9	0	0
229	1,07	13,5	13,1	4,9	0	0
231	1,07	13,4	13,3	5	0	0
233	1,07	13,6	13	5	0	0
235	1,07	13,6	12,9	5,1	0	0
237	1,07	13,6	12,6	5,1	0	0
239	1,07	13,6	12,6	5,1	0	0
241	1,07	13,6	12,5	5,2	0	0
243	1,06	13,5	12,5	5,3	0	0
245	1,06	13,5	12,1	5,3	0	0
247	1,06	13,4	12,3	5,3	0	0
249	1,05	13,1	12,4	5,3	0	0
251	1,05	13,2	12,4	5,4	0	0
253	1,05	13,2	12,5	5,4	0	0

Анализ энергетических параметров

Анализ зависимостей $P=f(U)$, $Q=f(U)$, $S=f(U)$ (табл. 1) показывает, что активная мощность светильника остается строго постоянной (50 Вт) во всем исследуемом диапазоне напряжений. Это свидетельствует о корректной работе импульсного источника питания Philips, который стабилизирует выходную мощность на нагрузке (светодиодах), изменяя потребляемый ток.



Зависимость тока от напряжения носит линейный обратно пропорциональный характер (рис. 2). Уравнение регрессии: $I = -0,0009 \cdot U + 0,4156$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9891$. Данное поведение является классическим для драйверов со стабилизацией мощности: при повышении входного напряжения ток потребления пропорционально снижается, чтобы сохранить мощность неизменной ($P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \approx \text{const}$).

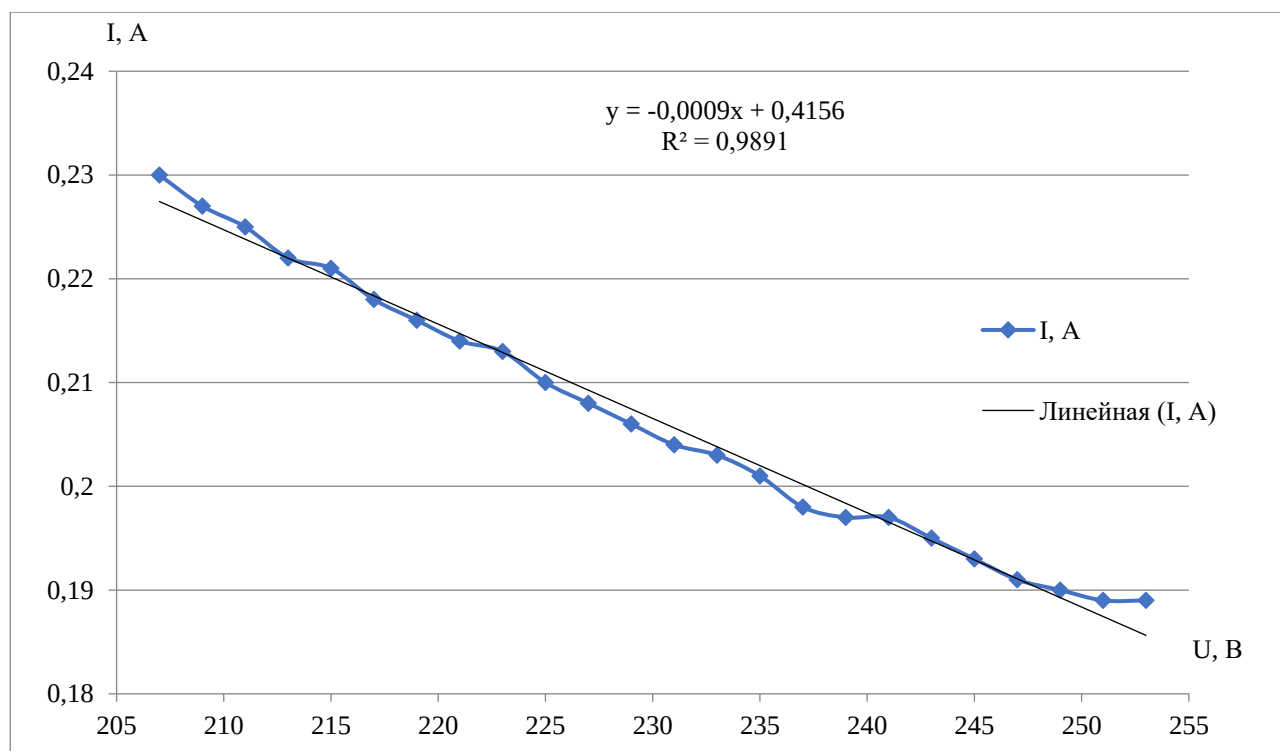


Рисунок 2. График зависимости тока от напряжения

Анализ светотехнических параметров

Наиболее важным для фитотехники параметром является создаваемая освещенность. Вопреки ожиданиям, что стабилизация мощности гарантирует стабильность светового потока, была выявлена тенденция к снижению освещенности при росте напряжения (рис. 3).

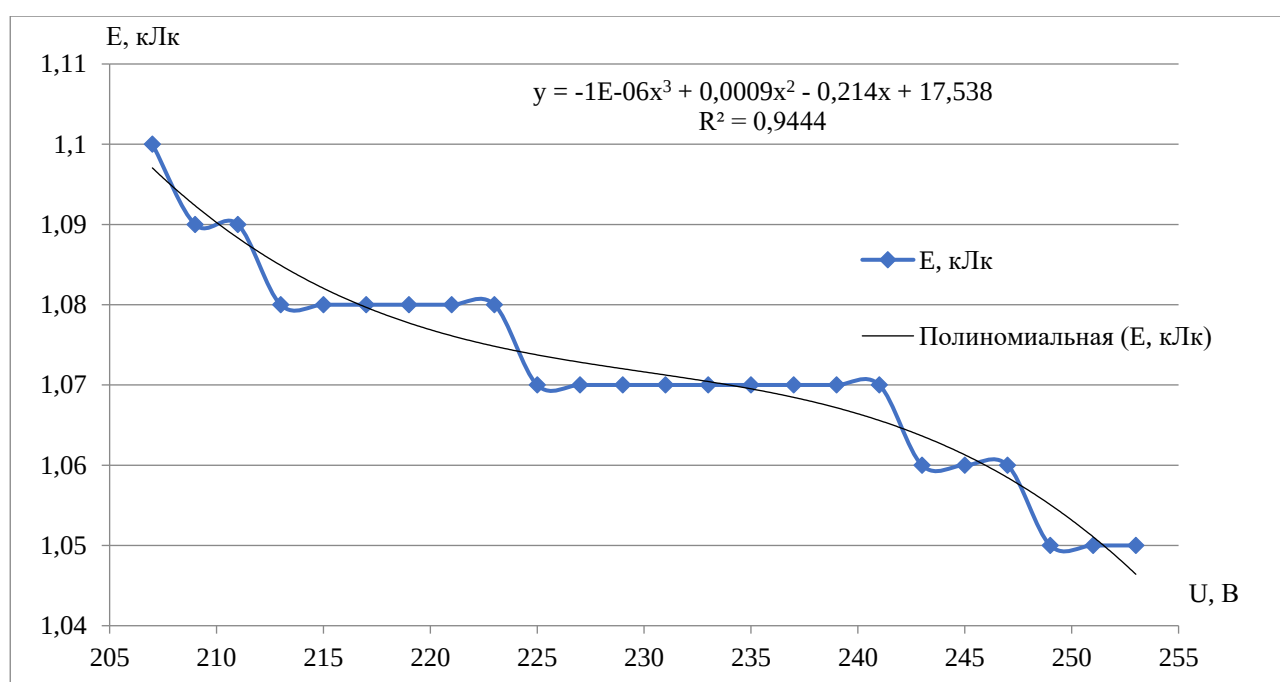


Рисунок 3. Зависимость освещенности от питающего напряжения



Зависимость имеет полиномиальный характер 3-й степени:

$$E = -0,000001 \cdot U^3 + 0,0009 \cdot U^2 - 0,2143 \cdot U + 17,538 \quad (R^2 = 0,9444).$$

Снижение освещенности с 1,10 кЛк при 207 В до 1,05 кЛк при 253 В составляет ~4,5%.

Это может быть вызвано нагревом р-п-перехода светодиодов. При снижении входного напряжения (и, соответственно, росте входного тока) КПД драйвера несколько падает, выделяется больше тепла, что ведет к росту температуры кристалла и, как следствие, снижению светоотдачи, что требует дальнейших исследований.

Анализ гармонических составляющих тока

Импульсные источники питания являются нелинейной нагрузкой. В ходе исследования зафиксировано, что светильник генерирует токи высших гармоник, преимущественно 3-й, 5-й и 7-й (в зоне низких напряжений).

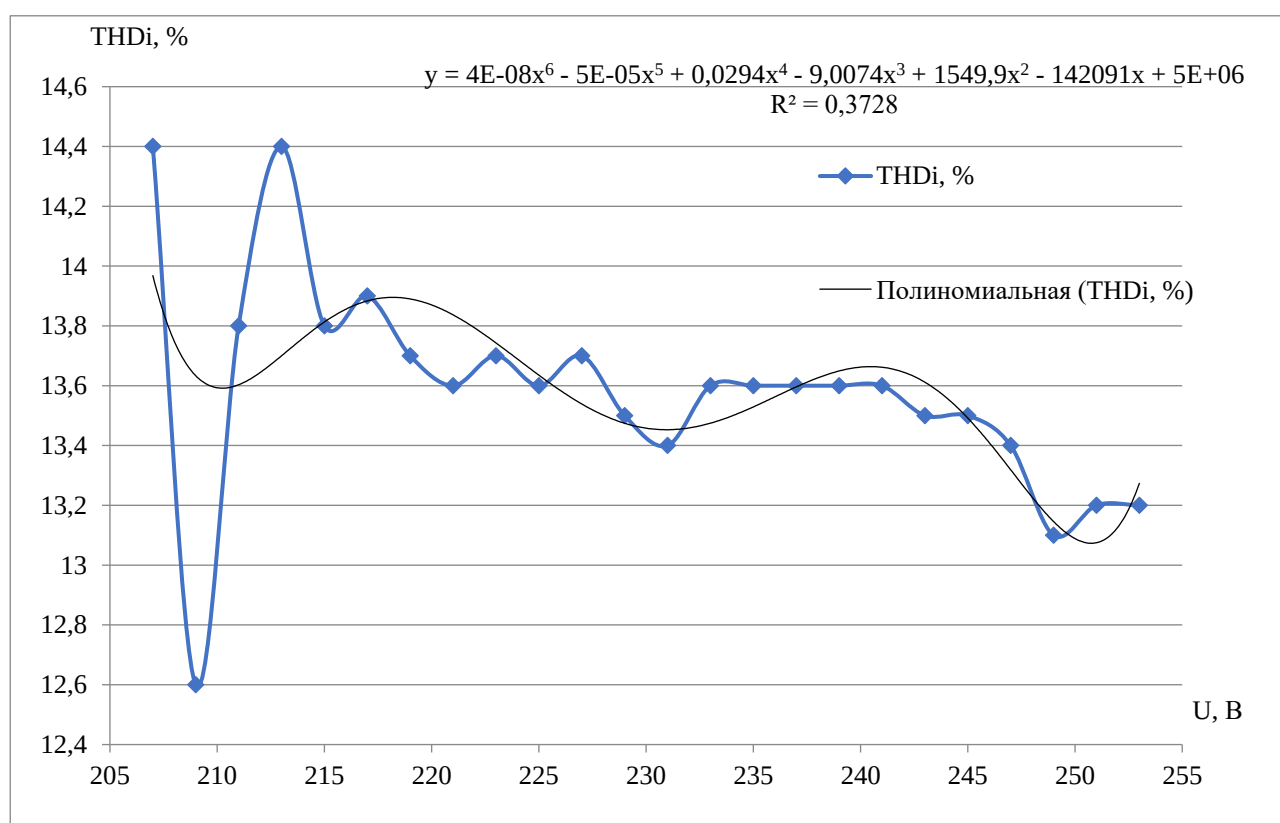


Рисунок 4. Зависимость THDi и гармоник от напряжения

Гармонический состав имеет ярко выраженную зону нелинейности (рис. 4):

3-я гармоника: Достигает максимума в зоне 213 В (13,8%), незначительно снижаясь к краям диапазона.

5-я гармоника: Имеет U-образную форму. Минимальное значение (4,5%) зафиксировано при 211 В, далее наблюдается устойчивый рост до 5,4% при 253 В. Полиномиальная зависимость 6-й степени демонстрирует высокую точность аппроксимации ($R^2 = 0,9426$).

7-я гармоника: Присутствует только в диапазоне пониженного напряжения (207-217 В). При достижении номинала и выше (219-253 В) значение 7-й гармоники падает до нуля.

Регрессионный анализ и моделирование

Для математического описания поведения светильника был проведен регрессионный анализ. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 > 0,94$) для тока и освещенности подтверждают достоверность полученных моделей.



Таблица 2

Регрессионные уравнения исследуемых параметров

Параметр (Y)	Вид уравнения	R ²
Ток (I), А	$I = -0,0009U + 0,4156$	0,9891
Освещенность (E), кЛк	$E = -0,000001 \cdot U^3 + 0,0009 \cdot U^2 - 0,2143 \cdot U + 17,538$	0,9444
THDi, %	$THDi = 0,00000004 \cdot U^6 - 0,00005 \cdot U^5 + 0,0294 \cdot U^4 - 9,0074 \cdot U^3 + 1549,9 \cdot U^2 - 142091 \cdot U + 5 \cdot 10^6$	0,3728
3-я гармоника, %	$H3 = -0,000000007 \cdot U^6 + 0,00001 \cdot U^5 - 0,0056 \cdot U^4 + 1,7372 \cdot U^3 - 303 \cdot U^2 + 28140 \cdot U - 1 \cdot 10^6$	0,5156
5-я гармоника, %	$H5 = 0,00000001 \cdot U^6 - 0,00001 \cdot U^5 + 0,0086 \cdot U^4 - 2,6763 \cdot U^3 + 467,98 \cdot U^2 - 43611 \cdot U + 2 \cdot 10^6$	0,9426
7-я гармоника, %	$H7 = -0,00000002 \cdot U^6 + 0,00003 \cdot U^5 - 0,0153 \cdot U^4 + 4,8474 \cdot U^3 - 861,82 \cdot U^2 + 81596 \cdot U - 3 \cdot 10^6$	0,8913

Анализ уравнений показывает, что такие параметры, как cosφ и мощность, являются константами и не зависят от напряжения в исследуемом диапазоне.

Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования влияния отклонений питающего напряжения на работу светодиодного фитосветильника TL-PROM FITO 45 UN можно сделать следующие выводы:

Энергетическая эффективность: Импульсный источник питания светильника успешно стабилизирует активную мощность на уровне 50 Вт во всем диапазоне напряжений от 207 В до 253 В. Коэффициент мощности остается близким к единице (0,99), что соответствует современным требованиям энергоэффективности.

Светотехнические характеристики: Выявлена статистически значимая обратная зависимость освещенности от уровня входного напряжения. Максимальная освещенность (1,10 кЛк) достигается при пониженном напряжении (207 В), данное наблюдение требует дальнейших исследований.

Электромагнитная совместимость (ЭМС): Наименьший уровень высших гармонических составляющих (особенно 5-й и 7-й) наблюдается при питающем напряжении 219 В. Несмотря на то, что абсолютные значения THDi находятся в пределах допустимых норм (обычно до 25-30% для техники данного класса) [6, 7], рост 5-й гармоники при напряжении выше 231 В является негативным фактором.

Практические рекомендации: С точки зрения баланса между стабильностью светового потока и минимизацией искажений в питающей сети, оптимальным режимом работы для фитосветильника TL-PROM FITO 45 UN является диапазон напряжения 220-230 В.

Список литературы:

1. Филатов Д.А., Терентьев П.В. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетике сельского хозяйства: учеб. пос.: Нижегородская ГСХА, 2017. – 116 с.
2. Кондратьева, Н. П. Влияние дополнительного светодиодного освещения на урожайность и себестоимость томатов в весенний период / Н. П. Кондратьева, П. В. Терентьев, Д. А. Филатов, С. И. Олоница // Светотехника. – 2021. – № 2. – С. 96-99.



3. Филатов, Д. А. Эффективный режим работы системы освещения при выращивании овощей в вертикальных фермах / Д. А. Филатов, П. В. Терентьев, А. С. Соколова, А. Е. Шкаликов, А. О. Соколов // Сельский механизатор. – 2021. – № 5. – С. 22–23.

4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: [с Поправкой и с Изменением N 1]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 39 с. – [Изд. с изм. от 25.10.2023].

5. Терентьев П.В. Исследование качества и повышение эффективности использования электроэнергии в электротехнических комплексах служебных и жилых зданий: дисс. канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2014. – 285 с.

6. ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2021. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с выходным током не более 16 А на фазу): [с Поправкой]. – Офиц. изд. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – [Изд. с изм. от 01.08.2023].

7. ГОСТ ИЕС 61000-3-12-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-12. Нормы. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых оборудованием, подключаемым к общественным низковольтным системам, с входным током более 16 А, но не более 75 А в одной фазе: [с Поправками]. – Офиц. изд. – М.: Стандартинформ, 2020. – [Изд. с изм. от 01.04.2020].

