УДК 621.316.925.1
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-8-13

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТОКА В ТЕРМИНАЛАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

И.Ю. Чака,
аспирант каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ

В.М. Збродыга,
доцент каф. электроснабжения и электротехники БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.Э. Обух,
инженер отдела автоматизации ОАО «Светлогорский ЦКК»

А.В. Ясюкевич,
студент агроэнергетического факультета БГАТУ

В статье рассмотрены теоретические предпосылки использования генерируемого в линию тока высокой частоты в качестве входного сигнала для срабатывания терминалов релейной защиты воздушных линий электропередач. Описан процесс возникновения стоячих волн высокочастотного тока и напряжения в проводах линии. Определено влияние на параметры высокочастотного тока распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов.

Ключевые слова: релейная защита, воздушная линия электропередач, параметры высокочастотного тока.

The article considers theoretical prerequisites of using the high frequency current generated in the line as an input signal for triggering the relay protection terminals of overhead power lines. The process of occurrence of standing waves of high-frequency current and voltage in the line conductors is described. The influence of distributed inductances, capacitances and active resistances of wires on the parameters of high-frequency current is determined.

Key words: relay protection, overhead power line, high-frequency current parameters.

Введение

Воздушные линии электропередач (ЛЭП) – это наиболее протяженные элементы электроэнергетической системы, которые проходят через населенные пункты, по лесным массивам, над сельскохозяйственными и прочими землями. В линиях электропередач наблюдается значительное количество повреждений, приводящих к аварийным и ненормальным режимам их работы. Несмотря на принимаемые меры безопасности, регулярно происходят несчастные случаи, связанные с поражением людей электрическим током. Создание и применение устройств релейной защиты, способных автоматически отключать линию электропередач при приближении на недопустимое расстояние к фазным проводам людей, механизмов и других токопроводящих предметов, позволило бы минимизировать количество и последствия таких несчастных случаев.

Для решения этой задачи авторы рассматривают возможность создания терминалов релейной защиты, пусковые органы которых реагируют на изменение параметров высокочастотного тока, генерируемого в фазные провода ЛЭП от внешнего генератора [1]. При этом в проводах наблюдается процесс возникновения стоячих волн тока и напряжения, впервые описанный М. Фарадеем, и который используется современными учеными для решения прикладных задач в различных областях науки, но применительно к релейной защите ЛЭП до настоящего времени не рассматривался.

Цель данной работы – определить влияние распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов ЛЭП на параметры генерируемого в линию высокочастотного тока, что можно будет использовать при разработке терминалов релейной защиты.

Основная часть

Воздушная линия электропередачи представляет собой подвешенные на изоляторах в открытом пространстве провода (проводники) неизменной длины, которые обладают постоянными значениями емкости (C), индуктивности (L) и активного сопротивления, распределенными вдоль длины провода. Если к середине проводника подключить источник постоянной электродвижущей силы (ЭДС), то его емкости зарядятся (рис. 1а).

При замыкании проводника начнет протекать ток разряда емкостей I, который имеет максимальное

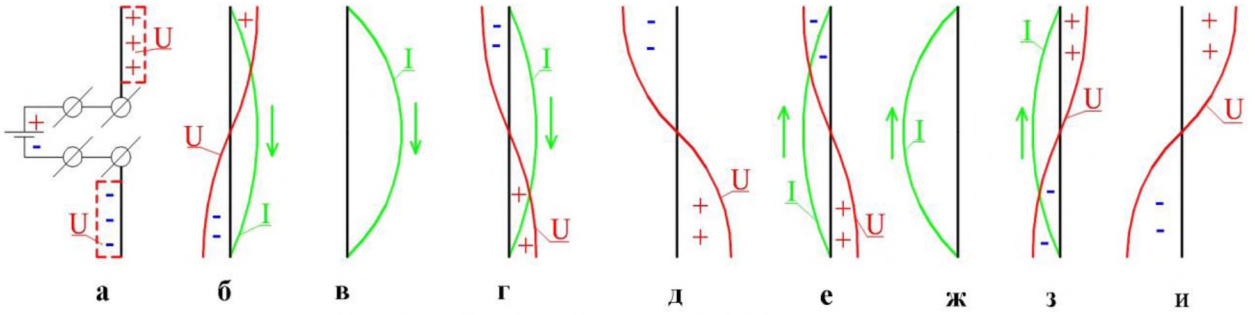

Рисунок 1. Колебания тока и напряжения в проводнике

значение в центре проводника и минимальное значение на его концах, так как величина емкости обратно пропорциональна расстоянию между обкладками конденсатора-проводника (рис. 1б). В индуктивностях проводника возникает ЭДС самоиндукции, из-за которой ток изменяется постепенно. На концах проводника возникают максимальные потенциалы, так как в их создании участвует большая часть индуктивности [2].

Когда ток течет к середине проводника, то потенциалы будут положительны, а от середины – отрицательны. После полного разряда емкостей ток достигает максимального значения, а электрическая энергия (за вычетом тепловых потерь на активном сопротивлении) преобразуется в энергию магнитного поля индуктивности (рис. 1в). Ток в индуктивностях провода течет в том же направлении (рис. 1г), и постепенно уменьшаясь до нуля, перезаряжает емкости (рис. 1д). Далее процесс протекает аналогично, в обратном направлении (рис. 1е – 1и).

Если пренебречь активным сопротивлением, то фазный провод можно рассматривать как колебательный L-C контур, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности (рис. 2).

После заряда конденсатора, кратковременным включением ключа К1 и последующего включения ключа К он начнет разряжаться на катушку (рис. 2). Так как в катушке возникает ЭДС самоиндукции, ток в ней ($i_к$) и напряжение на конденсаторе (u_c) изменяются постепенно. Когда конденсатор полностью разрядится, то энергия его электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля катушки, а ток в катушке достигнет своего максимального значения I_{max} (рис. 2, ωt=90°). Ток в катушке не может измениться скачком, и он плавно уменьшается, перезаряжая конденсатор. Когда ток снижается до нуля, то энергия магнитного поля катушки преобразуется в энергию электрического поля конденсатора (рис. 2, ωt=180°). Напряжение на конденсаторе достигает максимальной величины U_{max}, но имеет противоположный знак, так как ток в катушке сохраняет свое направление. Затем процесс повторится, но в противоположном направлении. Таким образом, в контуре возникают свободные электрические колебания, создающие стоячие волны тока и напряжения [2], с длиной волны λ (рис. 2).

Аналогичные явления происходят и при генерации в фазные провода линии электропередачи высокочастотного синусоидального тока длиной волны λ от подключенного к линии внешнего генератора. В этом случае на каждом из отрезков провода длиной λ возникают вынужденные колебания и создаются стоячие волны тока и напряжения. Эти отрезки представляют собой «растянутые» в длину колебательные контуры, индуктивность и емкость которых определяются их длиной.

На рис. 3а представлена эквивалентная электри-

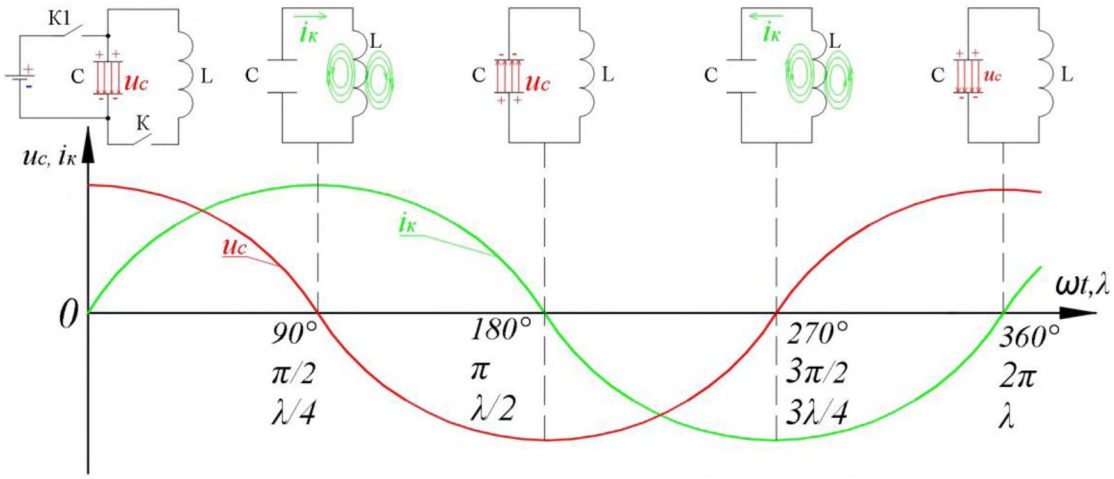

Рисунок 2. Свободные колебания тока и напряжения в L-C контуре

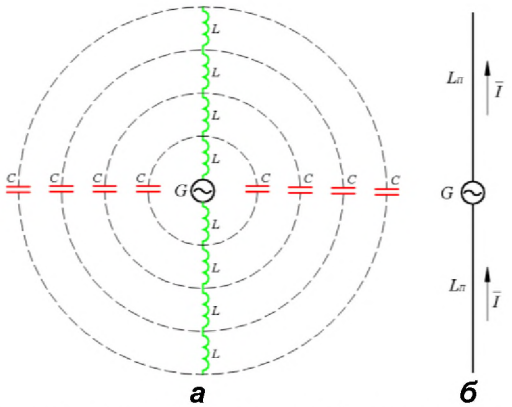

Рисунок 3. Схемы фазного провода линии электропередачи: а – эквивалентная электрическая; б – структурная

ческая схема фазного провода линии электропередачи [3], посередине которого подключен генератор тока высокой частоты G (рис. 3б), разделяющий его на два равных участка длиной $L_{\text{п}}$.

Зная распределение стоячих волн тока и напряжения по проводнику, можно рассчитать его полное сопротивление генератору [4]:

$$Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + jX_{\text{ВХ}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ВХ}}$ – активное сопротивление, Ом;

$X_{\text{ВХ}}$ – реактивное сопротивление, Ом.

Активное $R_{\text{ВХ}}$ и реактивное $X_{\text{ВХ}}$ сопротивления провода току генератора зависят от его длины $L_{\text{П}}$.

$$X_{\text{ВХ}} = \frac{U_{L\text{п}}}{I_{L\text{п}}}, \quad (2)$$

где $U_{L\text{п}}$ – величина стоячей волны напряжения, В;

$I_{L\text{п}}$ – величина стоячей волны тока, А.

$$I_{L\text{п}} = I_{\max} \cdot \sin\frac{2\pi L_{\text{П}}}{\lambda}; \quad (3)$$

$$U_{L\text{п}} = U_{\max} \cdot \cos\frac{2\pi L_{\text{П}}}{\lambda}, \quad (4)$$

где $I_{\max}$ – максимальные (амплитудные) значения тока, А (рис. 2);

$U_{\max}$ – максимальные (амплитудные) значения напряжения, В (рис. 2).

При различных отношениях длины провода ЛЭП к длине волны генератора ($L_{\text{П}}/\lambda$) и угловой частоте тока ω возникают различные сочетания активного ($r_{\text{к}}$), индуктивного (ωL) и емкостного ($1/\omega C$) реактивных сопротивлений, образующих последовательный и параллельный колебательные контуры, схемы замещения и векторные диаграммы для которых приведены на рисунках 4, 5.

Активное сопротивление провода высокочастотному току:

$$r_k = R_{\Sigma} + R_{\text{П}}, \quad (5)$$

где R_{Σ} – активное сопротивление излучения провода, Ом;

$R_{\text{П}}$ – активное сопротивление тепловых потерь, Ом.

Тепловые потери обуславливаются нагреванием, а сопротивление зависит от сечения, материала и длины провода:

$$R_{\text{П}} = \rho\frac{L_{\text{п}}}{S}, \quad (6)$$

где ρ – удельное активное сопротивление провода, Ом·мм^2/м

$L_{\text{П}}$ – длина провода, м;

S – площадь поперечного сечения провода, мм^2

Сопротивление излучения зависит от характера распределения тока в излучающем проводе и описы-

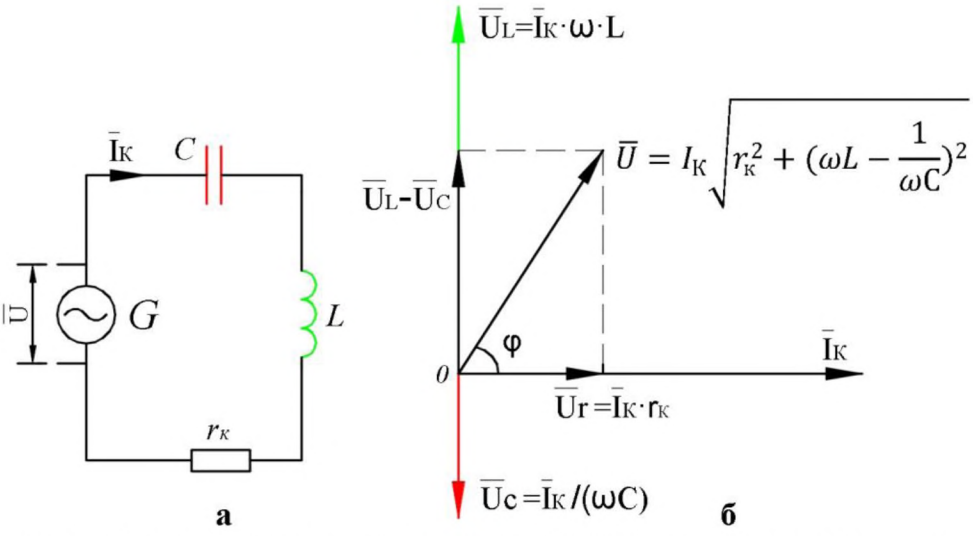

Рисунок 4. Последовательный колебательный контур при любых значениях Lп/λ, кроме 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д.:
а – схема замещения; б – векторная диаграмма;
U_r, U_L, U_C – активная, индуктивная и емкостная составляющие напряжения;
I_K – ток высокочастотного генератора

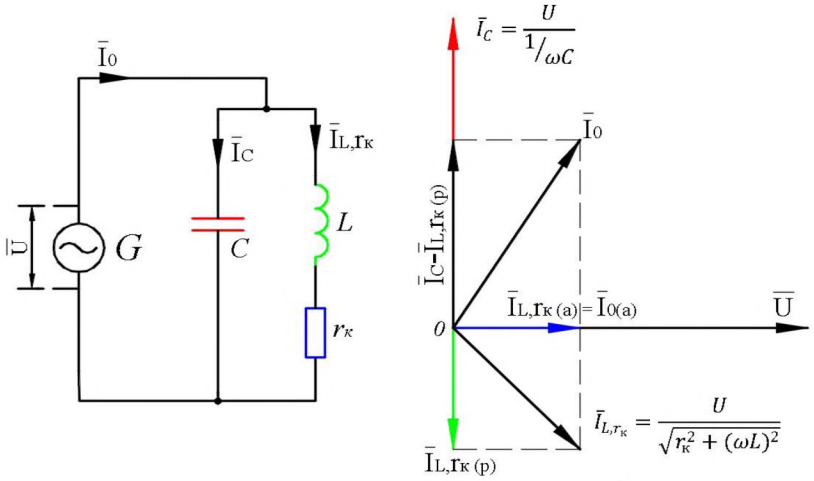

Рисунок 5. Параллельный колебательный контур при значениях Lп/λ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д.:
а – схема замещения; б – векторная диаграмма;
I_0, $I_{0(a)}$ – ток высокочастотного генератора и его активная составляющая;
I_C, $I_{L,rк}$ – емкостная и активно-индуктивная составляющая тока

вается формулой [5]:

$$R_\Sigma = 30\left[\left(si4kL_П - 2si2kL_П\right)sin2kL_П + \right.$$
$$+\left(c + lnkL_П + ci4kL_П - 2ci2kL_П\right)\times$$
$$\left.\times cos2kL_П + 2\left(c + ln2kL_П - ci2kL_П\right)\right], \qquad (7)$$

где *si* – интегральный синус [6], о.е.;
ci – интегральный косинус [7] , о.е.;
c – постоянная Эйлера, о.е.;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число свободного пространства, рад /м.

На рисунке 6 представлена кривая изменения сопротивления излучения в зависимости от отношения длины провода $L_П$ к длине волны λ согласно [5].

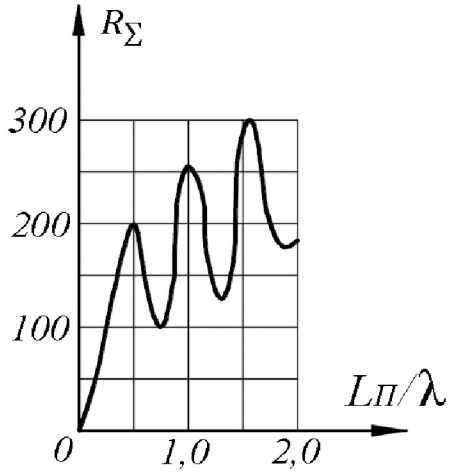

Рисунок 6. Характер изменения сопротивления излучения провода в зависимости от отношения его длины к длине волны

С изменением длины провода от нуля до λ/2 сопротивление излучения непрерывно возрастает. При длине провода $L_П$>λ/2, когда в его длине укладывается одна целая полуволна и часть следующей, в проводе появляются участки, в которых направление токов противоположно направлению токов в крайних участках. Излучение этих участков ослабляет излучение крайних участков, и сопротивление излучения снижается. С ростом длины $L_П$ оно снова возрастает до $L_П$ = λ. При дальнейшем увеличении длины проводника чередуется убывание и возрастание сопротивления, причем его значение в максимумах и минимумах постепенно возрастает.

Входное сопротивление провода при значениях $L_П$/λ 0,25; 0,75; 1,25 и т. д. соответствует резонансу в последовательном контуре, когда реактивная часть комплексного сопротивления контура компенсирована и равна нулю, а активная часть имеет минимальное значение (рис. 4). Тогда ток, протекающий через контур, имеет максимальное значение.

Активная мощность, потребляемая проводом в последовательном контуре:

– при питании максимальным током:

$$P_A = \frac{1}{2} I_{Lп}^2 \cdot R_{BX}, \qquad (8)$$

– при отсутствии реактивного сопротивления (резонанс напряжений):

$$P_A = \frac{1}{2} I_{max}^2 \cdot r_k, \qquad (9)$$

Подставляя выражение (2) в (8) и приравнивая правые части (8) и (9), получим:

$$\frac{1}{2} I_{max}^2 \cdot \sin^2 \frac{2\pi L_П}{\lambda} \cdot R_{BX} = \frac{1}{2} I_{max}^2 \cdot r_k. \qquad (10)$$

Откуда

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{r_{\text{к}}}{\sin^2 \frac{2\pi L_{\text{П}}}{\lambda}}. \quad (11)$$

Входное сопротивление провода при значениях $L_{\text{П}}/\lambda$ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 соответствует резонансу в параллельном контуре (рис. 5), когда реактивное сопротивление контура равно нулю, а активное сопротивление имеет максимальное значение. Тогда ток, протекающий через контур, имеет минимальное значение.

Активная мощность, потребляемая проводом в параллельном контуре:

$$P_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\max}^2}{R_{\text{ВХ}}} \quad (12)$$

Приравнивая правые части выражений (9) и (12), получим:

$$\frac{1}{2} I_{\max}^2 \cdot r_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\max}^2}{R_{\text{ВХ}}}, \quad (13)$$

и учитывая, что отношение максимальных значений напряжения и тока представляет собой волновое сопротивление $Z_{0\text{А}}$ [8], получим:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{Z_{0\text{А}}^2}{r_{\text{К}}}, \quad (14)$$

где $Z_{0\text{А}}$ – волновое сопротивление, Ом.

В реальной ЛЭП контуры, образованные емкостью и индуктивностью, не являются идеальными из-за наличия возрастающих с длиной провода тепловых потерь, потерь в проводящем слое земли и потерь на излучение [9]. Активная составляющая входного сопротивления при резонансе напряжений периодически снижается, а при резонансе токов возрастает с увеличением длины проводов. Реактивная составляющая входного сопротивления становится равной нулю вблизи значений $L_{\text{П}}/\lambda$ равных 0,25; 0,75; 1,25; и т. д. Затем возрастает, а вблизи значений $L_{\text{П}}/\lambda$ равных 0; 0,5; 1; 1,5; 2 и т. д. быстро падает до нуля, а затем возрастает, изменив свое значение на емкостное. С увеличением $L_{\text{П}}$ величины максимумов $R_{\text{ВХ}}$ и $X_{\text{ВХ}}$ постепенно снижаются и становятся менее выраженными.

На рисунке 7 показаны величина и характер изменения реактивного и активного сопротивлений в зависимости от длины для реального провода.

Значение высокочастотного тока в проводе:

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{2U_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ВХ}}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – выходное напряжение идеального генератора, В;

2 – коэффициент, учитывающий уменьшение входного сопротивления провода в два раза при использовании проводящего слоя земли в качестве второго провода [10].

Следовательно, значения распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов влияют на величину входного сопротивления ЛЭП и значение генерируемого в нее высокочастотного тока, а максимальное значение высокочастотного тока возникает при резонансе напряжений, когда $X_{\text{ВХ}}$ минимально.

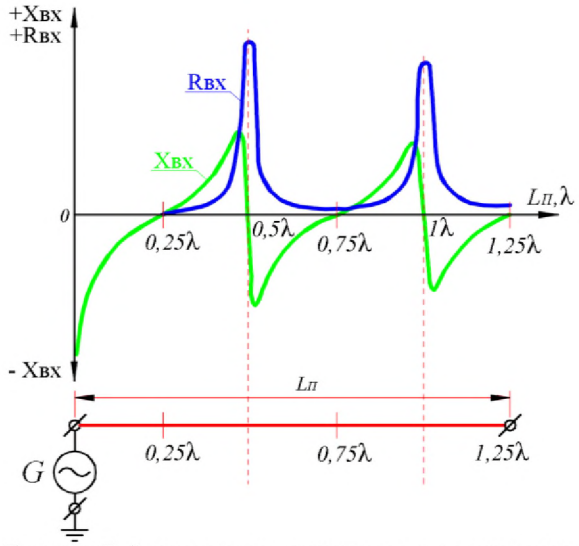

Рисунок 7. Зависимость активного и реактивного сопротивлений провода от его длины

Заключение

1. При подключении к ЛЭП внешнего генератора высокочастотного синусоидального тока в проводах возникают вынужденные колебания и создаются стоячие волны тока и напряжения, параметры которых зависят от значений распределенных индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений проводов.

2. Приближение к ЛЭП людей или проводящих предметов приведет к изменению распределенных индуктивностей и емкостей проводов, входного сопротивления и величины тока подключенного к ним высокочастотного генератора.

3. Изменение параметров высокочастотного тока можно использовать в качестве входного сигнала срабатывания терминалов релейной защиты для минимизации количества и последствий несчастных случаев, связанных с поражением людей электрическим током при их приближении к ЛЭП на недопустимое расстояние.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чака, И.Ю. Об использовании высокочастотного тока в терминалах релейной защиты линий электропередач / И.Ю. Чака, В.М. Збродыга // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 октября 2024 г.: в 2 ч. / Белор. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк (науч. ред.) [и др.] . – Минск: БГАТУ, 2024. – Ч. 1. – С. 263-265.

2. Гвоздев, Н.И. Электромагнитные волны и антенны / Н.И. Гвоздев – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 320 с.

3. Игнатьев, Н.П. Антенны и радиоволновые устройства / Н.П. Игнатьев. – М.: Высшая школа, 2010. – 350 с.

4. Маслов, К.А. Стоячие волны в радиотехнике / К.А. Маслов. – М.: Радио и связь, 2003. – 190 с.

5. Кочетков, А.В. Радиосистемы и антенны / А.В. Кочетков. – Казань: Казанский университет, 2015. – 290 с.

6. Лебедев, И.М. Теория антенн / И.М. Лебедев. – М.: Современные технологии, 2012. – 218 с.

7. Петросян, Н.С. Специальные функции: учеб. пособие / Н.С. Петросян. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2015. – 88 с.

8. Петров, А.И. Антенны и их параметры / А.И. Петров. – М.: Энергия, 2017. – 330 с.

9. Сергеева, Н.В. Основы распространения радиоволн / Н.В. Сергеева. – М.: ИНФОРМАЦИЯ, 2019. – 180 с.

10. Тихонов, А.Н. Радиоволны и их технологии / А.Н. Тихонов. – М.: Высшая школа, 2014. – 240 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.02.2025

УДК 697.273
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-13-17

МОДУЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОРПУСОВ

Е.С. Шмелев,
Ученый секретарь Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

А.П. Ахрамович,
ведущ. науч. сотр. Института энергетики НАН Беларуси, канд. техн. наук

К.В. Гаркуша,
ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ

В статье рассмотрена модульная инфракрасная система отопления крупногабаритных производственных корпусов и показаны ее преимущества. Описаны структура и функционирование инфракрасного модуля. Приведены основные положения управления тепловыми условиями.

Ключевые слова: электрические высокотемпературные излучатели, отражатель с кусочно-непрерывным профилем поверхности, инфракрасный обогрев, модульная система отопления, тепловая модель, управление, энергоэффективность.

The article considers a modular infrared heating system for large-sized buildings and presents its advantages. The structure and functioning of the infrared module are described. The basic provisions of thermal conditions control are given.

Key words: electric high temperature emitters, reflector with a piecewise continuous surface profile, infrared heating, modular heating system, thermal model, regulation, energy efficiency.

Введение

Сельскохозяйственное машиностроение является одной из ведущих отраслей экономики Республики Беларусь. Производство тракторов, комбайнов, навесной и прицепной техники обеспечивает не только внутренние потребности, но и вносит значительный вклад в экспортный потенциал государства. Сохранение и укрепление конкурентоспособности продукции требуют постоянного обновления, модернизации производства, внедрения инновационных технологий. Для эффективной работы современного оборудования необходимо жесткое соблюдение технологического регламента, в том числе строгое поддержание требуемых микроклиматических параметров. Учитывая, что изготовление крупногабаритных изделий производится в цехах площадью в тысячи квадратных метров и с высотой пролетов свыше десяти метров, то эта задача является сложной. Традиционно обогрев таких цехов осуществляется воздушной отопительной системой, совмещенной с вентиляцией. Выход нагретого воздуха производится над рабочей зоной, в результате чего значительная часть тепла уносится в верхнюю область цеха. Большой расход энергии сказывается и на себестоимости продукции.

Альтернативный (инфракрасный) способ отопления использует радиационный механизм переноса энергии. В этом случае обогревается не весь объем помещения, а только облучаемые объекты, что резко сокращает расход энергии. Преимущества данного способа неоднократно доказывались и теоретически, и на практике [1-5].

Вопросам лучистого обогрева посвящены работы Ф.А. Миссенара, А.И. Богомолова, А. Мачкаши, А.К. Родина, Н.Н. Болотских и других.