

УДК 628.979:581.035

© Е. Н. Ракутько, С. А. Ракутько, Г. В. Медведев, С. В. Гулин, 2025

РАЗРАБОТКА СВЕТОДИОДНОГО ФИТООБЛУЧАТЕЛЯ И ЕГО ТЕСТИРОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Проблема энергосбережения в оптических электротехнологиях актуальна для современных фитооблучателей на основе светодиодов, которые на настоящий момент уверенно заняли свою нишу в светокультуре. Такие фитооблучатели имеют ряд особенностей, требующих учета при их проектировании и анализе. Областью применения разработанного фитооблучателя являются прежде всего экспериментальные исследования по энергоэкологии светокультуры. Возможно также его использование в частном секторе и малых тепличных хозяйствах для облучения как рассады, так и длинностебельных растений. Задачей являлось создание простого устройства, обеспечивающего возможность достаточно точного для практики регулирования спектра излучения и автоматического включения в зависимости от времени суток и уровня естественной освещенности. В устройстве фитооблучателя применен новый компоновочный принцип: равномерно распределенные по теплоотводящей поверхности разноспектральные светодиоды объединены в отдельные электрические группы, коммутируемые в целях получения необходимого спектрального состава потока излучения. Методика получения экспериментальных данных предусматривает измерение спектральных, фотометрических, электрических и тепловых характеристик прибора. Результаты подтвердили эффективность разработанного фитооблучателя, сочетающего точность регулирования спектра с энергоэффективностью.

Ключевые слова: светокультура, энергосбережение, фитооблучатель, светодиод, энергоемкость

ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды (СД) на настоящий момент уверенно заняли свою нишу в светокультуре. Облучатели, используемые при выращивании растений (фитооблучатели, ФО), имеют ряд особенностей, требующих учета при анализе, расчете и выполнении конструкций на их основе. Применение СД в составе ФО при прочих равных условиях позволяет существенно снизить их электропотребление по сравнению с традиционными облучателями [1]. Появление СД ФО привело к существенным технологическим изменениям в растениеводстве. Стало возможным создавать эффективные "рецепты" для выращивания растений, настраивая спектр фотосинтетически активной радиации для каждого вида или сорта [2]. Современные ФО выполняют оптимизированными для выращивания растений в тепличных условиях, являясь одним из наиболее эффективных и энергосберегающих технических средств обеспечения растений светом с необходимым спектральным составом [3].

Светотехнические характеристики ФО непосредственно влияют на рост и урожайность растений [4]. Гибкость в управлении спектром излучения имеет ключевое значение для оптимизации фитооблучения в различных стадиях роста растений и для различных видов культур. В разные периоды роста растений требуются различные ком-

бинации спектральных диапазонов, чтобы стимулировать определенные физиологические процессы: фотосинтез, цветение и формирование плодов. Каждый спектральный диапазон по-своему значим и необходим для успешного развития растения. Широко распространены ФО, построенные на СД, излучающих в наиболее фотосинтетически активных спектральных диапазонах: синем (400–500 нм) и красном (600–700 нм) [5]. В синем диапазоне происходит инициация синтеза хлорофилла, он играет важную роль в фотоморфогенных изменениях в растениях, включая удлинение стебля и разрастание листьев, являясь важной составляющей для фототропизма и устьичной апертуры, способствует увеличению содержания хлорофилла. Красный диапазон является основным для выращивания сельскохозяйственных культур на большинстве этапов роста и развития. Он наиболее энергетически эффективен для стимулирования фотосинтеза. Излучение в дальнекрасном диапазоне (700–800 нм) вызывает синдром избегания тени, связанный с удлинением междоузлий, способствует увеличению площади листьев и цветению, стимулирует накопление фитонутриентов. При использовании дальнего красного излучения в сочетании с более короткими длинами волн происходит синергетическое стимулирование развития растений ("эффект усиления Эмерсона") [6]. Зеленые (500–600 нм), желтые (540–570 нм) и оранжевые (570–

600 нм) СД имеют меньшую фотосинтетическую эффективность, некоторые исследователи считают их применение в ФО нецелесообразным [7]. Помимо цветных СД, излучающих в разных узких диапазонах видимого спектра, в ФО используют СД белого света, излучающие в широком диапазоне (400–700 нм). Их применение возможно на протяжении основного периода роста [8]. Комбинация различных типов СД обеспечивает более тонкий подбор излучения различного спектра для различных видов растений.

Обычно разрабатываемые для светокультуры ФО ориентированы в первую очередь на обеспечение максимального благоприятного режима роста и развития растений [9]. Однако их функционала недостаточно в экологических исследованиях для создания и воспроизведения условий управляемого стресса. В исследованиях по энергоэкологии светокультуры такие режимы важны для отработки методов биоиндикации, создания приборного обеспечения исследований, расширения диапазона измеряемых величин путем управляемого изменения фенотипа растений [10].

Целью настоящей работы является разработка и тестирование экспериментального светодиодного ФО, позволяющего варьировать спектральным составом излучения, облученностью и фотопериодом в исследованиях при изучении влияния стрессовых условий в светокультуре.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной областью применения разработанного ФО являются экспериментальные исследования

по энергоэкологии светокультуры. Возможно применение ФО в частном секторе и малых тепличных хозяйствах. В связи с этим задачей является создание простого устройства, обеспечивающего возможность достаточного для практики точного регулирования спектра излучения, автоматического включения в зависимости от времени суток и уровня естественной освещенности и пригодного для облучения как рассады, так и длинно-стебельных растений.

Спектральный состав излучения должен в максимальной степени оказывать стрессирующее действие на растения, влияя на их фенотип. Этому требованию удовлетворяют крайние диапазоны оптического излучения — синий и дальнекрасный. Наличие белого необходимо для проведения обслуживающих работ, а также как основа для добавления узкоспектральных излучений. Для удобства в эксплуатации реализовано ступенчатое регулирование спектра за счет коммутирования групп СД.

УСТРОЙСТВО ФИТООБЛУЧАТЕЛЯ

Блок управления 1 (рис. 1) помещен в герметичную пластиковую коробку, прикрепленную к выполненному из алюминиевого профиля с оребрением радиатору 2 в его верхней при горизонтальном расположении радиатора части. Подача питающего напряжения в корпус осуществляется с помощью сетевого кабеля 8 через герметичный ввод 9. Корпус сдвинут к одному из торцов радиатора.

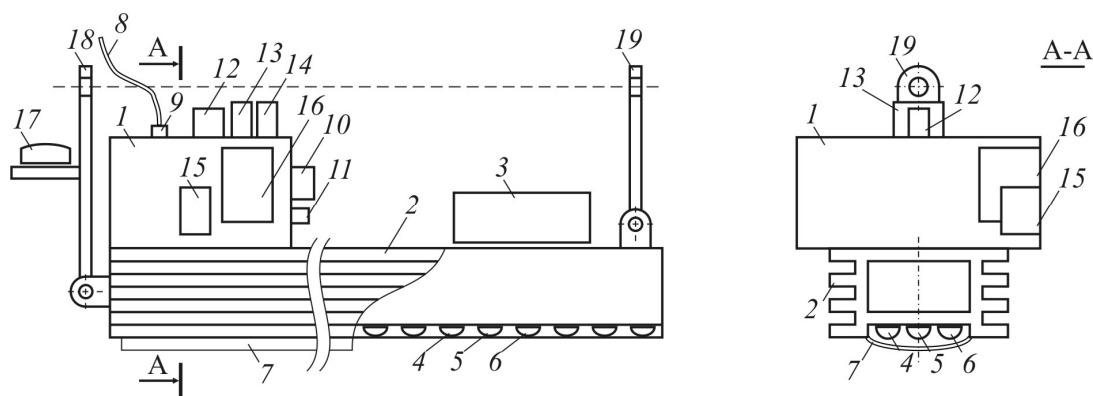


Рис. 1. Устройство фитооблучателя.

1 — блок управления; 2 — радиатор; 3 — регулируемый драйвер; 4, 5, 6 — синие, белые и дальнекрасные светодиоды; 7 — защитное покрытие; 8 — сетевой кабель; 9 — герметичный ввод; 10 — герметичный разъем; 11 — потенциометр; 12 — выключатель; 13, 14 — первый и второй переключатели; 15 — реле времени; 16 — реле освещенности; 17 — датчик естественной освещенности; 18, 19 — первая и вторая проушины

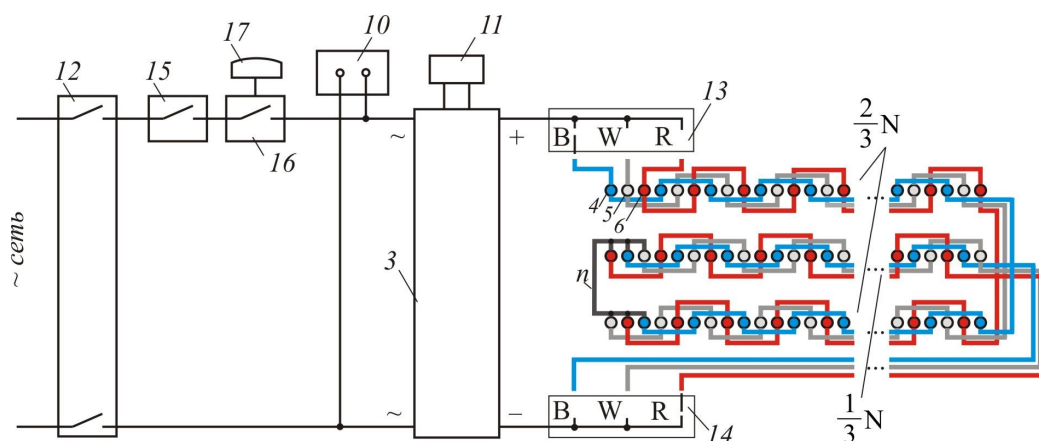


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ФО.
Номера элементов соответствуют номерам на рис. 1

К этому же торцу прикреплена первая проушина 18, вторая проушина 19 прикреплена ближе к его другому торцу к плоскости радиатора, противоположной поверхности расположения блока светодиодов. Проушины прикреплены к радиатору шарнирно, с возможностью поворота на 90° , что обеспечивает подвешивание ФО в горизонтальном и вертикальном положениях. К нижней части радиатора прикреплены группы светодиодов. Блок светодиодов прикрыт защитным покрытием 7. Датчик естественной освещенности 17 прикреплен к первой проушине перпендикулярно ей, что обеспечивает горизонтальную плоскость световоспринимающей поверхности датчика при любом положении ФО в пространстве.

Электрическая схема ФО (рис. 2) образована первичной и вторичной цепями драйвера 3, регулирование вторичного тока которого осуществляется потенциометром 11. Первичная цепь подключена к сети 220 В. В ней последовательно включены контакты выключателя 12, реле времени 15 и реле освещенности 16, соединенного с датчиком естественной освещенности 17. Контакты первичной цепи имеют выход на герметичный разъем 10. Вторичная цепь управляемого драйвера образована последовательно включенными контактами первого переключателя 13, параллельно включенными группами светодиодов и контактами второго переключателя 14. Светодиоды отдельных групп соединены последовательно в свои электрические цепи. Положения переключателей при выборе групп светодиодов 4, 5 и 6 промаркированы символами В (Blue, синий), W (White, белый) и R (far Red, дальнекрасный) соответственно. Все группы светодиодов в точке, соответствующей двум третям от общего количества светодиодов

в группе N с одного ее конца и одной трети с другого, электрически соединены между собой перемычкой n. Компоновочно светодиоды размещены на радиаторе в три линии, светодиоды с одним спектром излучения чередуются по ширине и по длине ФО.

Необходимый спектральный состав излучения задают положением ручек переключателей 13 и 14 (два переключателя на три положения, итого реализуется девять комбинаций спектра). Потенциометром 11 выставляют питающий светодиоды ток во вторичной цепи драйвера 3, от которого зависит интенсивность излучаемого светодиодами фотонного потока. Переключатель 13 задает $2/3$ потока выбранного диапазона, переключатель 14 — $1/3$ потока. В зависимости от необходимого положения ФО в пространстве используют для его подвеса первую 18 и вторую 19 проушины — горизонтальное положение, или только первую 18 — вертикальное положение. С помощью реле времени 15 задают моменты включения и выключения ФО. Подают питающее напряжение на схему с помощью выключателя 12. При низком уровне естественной освещенности, измеряемой датчиком 17, контакт реле освещенности 16 замкнут. Через герметичный разъем 10 возможно подключение дополнительных источников света или другого электрооборудования.

У изготовленного опытного образца ФО в качестве радиатора использовали алюминиевый профиль с оребрением, длина площадки под блок светодиодов составляет 990 мм. Все светодиоды скомпоновали в три линии по 45 шт. в каждой на алюминиевых теплоотводах типа Star. Крепеж теплоотводов к радиатору производили болтами М3 с применением термопасты. Расстояние между

крепежными местами теплоотвода составляет 21 мм. Отступ линии от торца ФО составляет 22.5 мм. Один болт крепит одновременно два теплоотвода с их противоположных сторон. Защитное покрытие 7 изготовили из прозрачного пластика толщиной 2 мм.

Использовали регулируемый драйвер марки ИПС120-700 ТУ IP67 1202. Максимальный ток вторичной цепи драйвера 0.69 А, диапазон напряжений 85–172 В. Использовали трехваттные СД производства Китай.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследование ФО проводили на лабораторном стенде, электрическое питание которого осуществляли через стабилизатор Б2-3, обеспечивающий нестабильность выходного напряжения не более 1% при изменении напряжения сети на 10%.

Спектральный состав излучения определяли спектрометром UPRtek MK350N. Сохраняли в графические файлы изображения спектров в относительных единицах, а в файлы в формате xls — абсолютные значения спектральной плотности энергетической облученности E_λ [мВт · м⁻² · нм⁻¹] на отдельных длинах волн в диапазоне 380–780 нм с шагом 1 нм. Энергетическую облученность E_e [Вт · м⁻²] определяли суммированием полученных отсчетов

$$E_e = \sum_{380}^{780} E_\lambda 10^{-3}. \quad (1)$$

Интегральную фотонную облученность E_ϕ [мкмоль · м⁻² · с⁻¹] в соответствии с [11] определяли по формуле

$$E_\phi = \sum_{380}^{780} \frac{\lambda \cdot E_\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} 10^{-6}, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; c — скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ м · с⁻¹; N_A — число Авогадро, $N_A = 6.023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Освещенность E_e измеряли с помощью люксметра ТКА. Датчики спектрометра и люксметра размещали напротив середины ФО, на расстоянии 50 см.

Фотонный поток F_ϕ [мкмоль · с⁻¹] определяли косвенным методом, суммируя вклад каждого СД в измеряемую фотонную облученность E_ϕ в предположении косинусного закона пространственного распределения излучаемого потока.

Электрические характеристики (напряжения, токи, активная мощность) измеряли астатически приборами класса точности 0.5. Ваттметр с номинальными значениями 5 А и 150 В использовали с трансформатором тока И54 (класс точности 0.2, коэффициент трансформации 0.1). Величину питающего схему напряжения выставляли ЛАТРОм и контролировали вольтметром Д566 класса точности 0.2. Параметры ФО снимали при включении различных групп СД, а также на группах WW при изменении тока драйвера I_2 . В относительных величинах значения параметра X определяли по формуле

$$k_X = X_\phi / X_n, \quad (3)$$

где X_ϕ , X_n — соответственно фактическое и номинальное (при максимальном токе драйвера $I_2 = 0.69$ А) значения показателя в соответствующих физических единицах.

Для анализа *энергетических* характеристик ФО как объекта исследования применен принцип сквозного энергетического анализа [12], хорошо зарекомендовавший себя при исследовании этапов технологического процесса облучения в оптических электротехнологиях [13], в частности при анализе работы схемы газоразрядных ламп с балластами различных типов [14], при изучении эффективности ламп, работающих в условиях отклонения питающего напряжения [15].

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема включения ФО (измерительные приборы не показаны). Произведена разметка схемы для проведения энергетического анализа, которая заключается в выделении ВЭБ (виртуальных энергетических блоков), соответствующих этапам преобразования энергии [16]. В рассматриваемом случае ВЭБ_I является абстракцией электрической цепи подключения драйвера к питающей сети 1, ВЭБ_{II} — драйвера 2, ВЭБ_{III} — СД 3. Совокупность этих блоков представляет собой общий ВЭБ₀.

Потребляемая из электрической сети энергия Q_o^n подается на вход ВЭБ_I ($Q_I^n = Q_o^n$). Эта энергия соответствует полной мощности S [В · А] ВЭБ_I, определяемой показаниями вольтметра, измеряющего напряжение сети U_c и амперметра, измеряющего потребляемый ток I_I .

На выходе ВЭБ_I фиксируется энергия Q_I^* , соответствующая активной мощности P_I [Вт], потребляемой драйвером и измеряемой ваттметром. Природа потерь энергии на этом этапе ΔQ_I заключается в несинусоидальном характере мгновенных значений тока I_I и напряжения U_c [17].

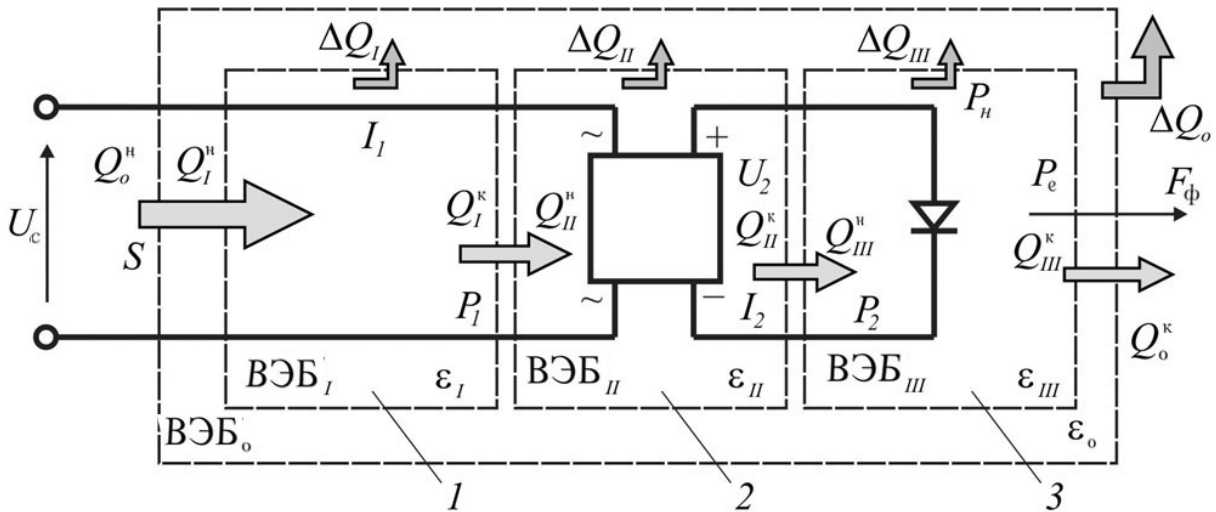


Рис. 3. Схема к анализу энергетической эффективности ФО.

Величина этих потерь

$$\Delta Q_I = Q_I^n - Q_I^k. \quad (4)$$

Энергоемкость ВЭБ_I [В·А·Вт⁻¹] составляет

$$\varepsilon_I = \frac{Q_I^n}{Q_I^k} = \frac{S}{P_I} = \frac{U_c I_I}{P_I}. \quad (5)$$

Полезно используемая энергия Q_I^k с выхода ВЭБ_I поступает на вход ВЭБ_{II} ($Q_{II}^n = Q_I^k$). На выходе ВЭБ_{II} фиксируется энергия Q_{II}^k , соответствующая активной мощности P_2 [Вт] в выходной цепи постоянного тока драйвера и определяемая показаниями вольтметра, измеряющего формируемое драйвером напряжение U_2 и амперметра, измеряющего рабочий ток СД I_2 . На этом этапе потери энергии ΔQ_{II} определяются КПД драйвера. Величина этих потерь

$$\Delta Q_{II} = Q_{II}^n - Q_{II}^k. \quad (6)$$

Энергоемкость ВЭБ_{II} [отн.ед.] составляет

$$\varepsilon_{II} = \frac{Q_{II}^n}{Q_{II}^k} = \frac{P_I}{P_2} = \frac{U_c I_I}{U_2 I_2}. \quad (7)$$

Далее полезно используемая энергия Q_{II}^k с выхода ВЭБ_{II} поступает на вход ВЭБ_{III} ($Q_{III}^n = Q_{II}^k$). На его выходе фиксируется энергия Q_{III}^k , соответ-

ствующая фотонному потоку F_ϕ [мкмоль · с⁻¹].

Потери на этом этапе ΔQ_{III} определяются степенью совершенства применяемых СД. Величина этих потерь

$$\Delta Q_{III} = Q_{III}^n - Q_{III}^k. \quad (8)$$

Энергоемкость ВЭБ_{III} [Дж · мкмоль⁻¹] составляет

$$\varepsilon_{III} = \frac{Q_{III}^n}{Q_{III}^k} = \frac{P_2}{F} = \frac{U_2 I_2}{F}. \quad (9)$$

Обратная найденной энергоемкости величина представляет собой фотонную отдачу η_ϕ [мкмоль · Дж⁻¹].

Общая энергоемкость ВЭБ₀ [В·А·мкмоль⁻¹ · с]

$$\varepsilon_o = Q_o^n / Q_o^k = \varepsilon_I \varepsilon_{II} \varepsilon_{III}. \quad (10)$$

Общие потери энергии

$$\Delta Q_o = Q_o^n - Q_o^k = \Delta Q_I + \Delta Q_{II} + \Delta Q_{III}. \quad (11)$$

Тепловые характеристики ФО определяли, измеряя изменение температуры радиатора с шагом 10 мин контроллером температуры Evco с датчиком NTC. Датчик располагали внутри радиатора, посередине его длины, в контакте с пластиной радиатора, на которой снаружи закреплены СД. Из переходного процесса определяли тепловую постоянную τ [с] как время, за которое радиатор нагревается на 63% от установившегося перепада температур ΔT [K].

Термическое сопротивление R_{th} [К·Вт⁻¹]

$$R_{th} = \frac{\tau}{cm}, \quad (12)$$

где c — удельная теплоемкость (для алюминия $c = 881$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹); m — масса радиатора, кг.

Мощность нагрева, P_n [Вт]

$$P_n = \frac{\Delta T}{R_{th}}. \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на излучение, P_e [Вт]

$$P_e = P_2 - P_n. \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи a [Вт·м⁻²·К⁻¹]

$$a = \frac{P_n}{S\Delta T}, \quad (15)$$

где S — эквивалентная площадь поверхности радиатора, м².

Экспериментальные данные обрабатывали с использованием пакета EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры ФО

На рис. 4 показаны спектры излучения (в относительных единицах) при различных сочетаниях переключателей 13 и 14, коммутирующих различные группы СД.

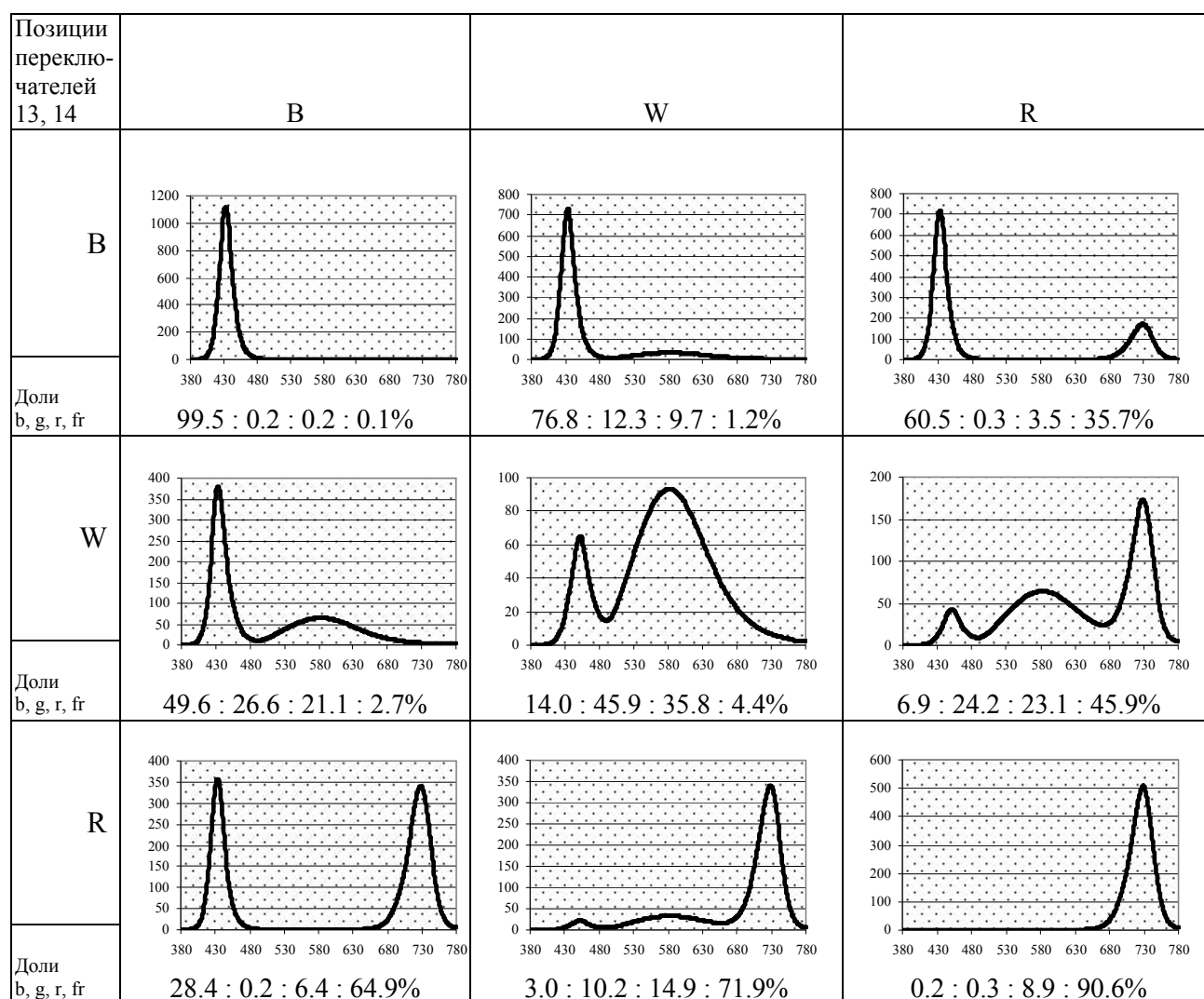


Рис. 4. Спектры излучения при включении различных групп СД.
Диапазоны спектра: b — синий, g — зеленый, r — красный, fr — дальнекрасный

Указаны также процентные спектральные соотношения энергии в отдельных диапазонах — синем (b), зеленом (g), красном (r), дальнем красном (fr) — по отношению к суммарной излучаемой энергии.

При сочетании ВВ (только синие СД) спектр излучения представляет собой узкий пик на длине волны 433 нм и шириной на уровне половины амплитуды 22 нм. Практически вся энергия излучается в синем диапазоне. При сочетании RR (только дальнекрасные СД) спектр излучения представляет собой узкий пик на длине волны 729 нм шириной 38 нм. Основная часть энергии (90.6%) излучается в дальнекрасной области, 8.9% — в красной области. При включении групп WW (только белые СД) спектр излучения представляет собой совокупность узкого пика на длине волны 452 нм шириной 32 нм (14.0% энергии) и области излучения с максимумом на длине волны 584 и шириной 120 нм, захватывающей зеленую (45.9% энергии) и красную (35.8% энергии) области спектра. Сочетания RB и BR позволяют получить спектры, в которых соотношения энергии в синем и дальнекрасном диапазонах составляют 28.4 : 64.9% и 60.5 : 35.7% соответственно. Излучение в зеленом и красном диапазонах практически отсутствует. Сочетания WB и BW позволяют получить спектры, в которых соотношения энергии в синем, зеленом и красном диапазонах составляют 49.6 : 26.6 : 21.1% и 76.8 : 12.3 : 9.7% соответственно. Излучение в дальнекрасном диапазоне практически отсутствует. Сочетания RW и WR позволяют получить спектры, в которых соотно-

шения энергии в зеленом, красном и дальнекрасном диапазонах составляют 10.2 : 14.9 : 71.9% и 24.2 : 23.1 : 45.9% соответственно. Излучение в синем диапазоне практически отсутствует.

На рис. 5 представлена спектральная плотность фотонной облученности в абсолютных единицах при различных сочетаниях положения переключателей. В абсолютных единицах спектральная плотность фотонной облученности при сочетании ВВ составляет $4.05 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{нм}$, RR — $3.10 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{нм}$, WW — $0.46 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{нм}$. Это и определяет различную величину интегрального фотонного потока групп.

Параметры ФО при различных сочетаниях групп СД

Результаты измерений параметров ФО при напряжении сети $U_c = 220 \text{ В}$ и максимальном токе во вторичной цепи драйвера $I_2 = 0.69 \text{ А}$ при различных сочетаниях групп СД показаны в табл. 1. Потребляемый ток варьирует в диапазоне от 0.35 (RR) до 0.56 А (ВВ); потребляемая активная мощность — от 74.0 (RR) до 121.0 Вт (ВВ); напряжение во вторичной цепи драйвера — от 99.0 (RR) до 162.0 В (ВВ); мощность во вторичной цепи драйвера — от 68.3 (RR) до 111.8 Вт (ВВ); полная мощность — от 77.0 (RR) до 123.2 В·А (ВВ). Численные значения этих электрических параметров принимают минимальные значения на группах с красными СД и максимальные значения на группах с синими СД.

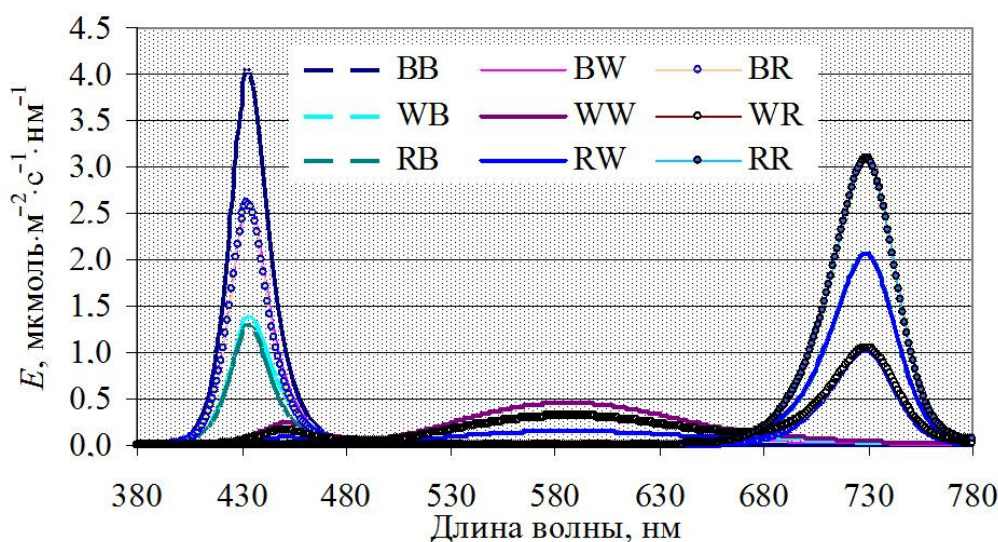


Рис. 5. Спектральная плотность фотонной облученности при включении различных групп СД.

Табл. 1. Параметры ФО при различных сочетаниях групп СД

Параметр	BB	BW	BR	WB	WW	WR	RB	RW	RR
I_I , А	0.56	0.554	0.49	0.55	0.54	0.48	0.42	0.415	0.35
P_I , Вт	121.0	120.0	105.0	118.0	117.0	103.0	89.0	88.0	74.0
U_2 , В	162	160	141	158	156	138	120	118	99
P_2 , Вт	111.8	110.4	97.3	109.0	107.6	95.2	82.8	81.4	68.3
S , В·А	123.2	121.9	107.8	121.0	118.8	105.6	92.4	91.3	77.0
F_ϕ , мкмоль·с ⁻¹ ,	122.4	107.9	130.2	96.9	81.4	106.3	142.6	129.5	153.4
η_ϕ , мкмоль·Дж ⁻¹	1.10	0.98	1.34	0.89	0.76	1.12	1.72	1.59	2.25
E_c , клк	0.417	2.020	0.301	3.578	4.984	3.437	0.191	1.786	0.093
E_e , Вт·м ⁻²	28.6	23.6	25.6	19.5	14.5	17.0	23.8	19.2	21.5
E_ϕ , мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	104.0	91.6	110.6	82.3	69.1	90.3	121.2	110.0	130.3
ε_I , В·А·Вт ⁻¹	1.02	1.02	1.03	1.03	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04
ε_{II} , отн. ед.	1.08	1.09	1.08	1.08	1.09	1.08	1.07	1.08	1.08
ε_{III} , Дж·мкмоль ⁻¹	0.91	1.02	0.75	1.12	1.32	0.90	0.58	0.63	0.45
ε_o , В·А·мкмоль ⁻¹ ·с	1.01	1.13	0.83	1.25	1.46	0.99	0.65	0.71	0.50

Фотонный поток варьирует от 81.4 (WW) до 153.4 мкмоль·с⁻¹ (RR); фотонная отдача — от 0.76 (WW) до 2.25 мкмоль·Дж⁻¹ (RR); фотонная облученность — от 69.1 (WW) до 130.3 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ (RR). Таким образом, излучающая способность ФО минимальна на белых СД и максимальна на красных СД. Создаваемая ФО освещенность варьирует от 0.093 (RR) до 4.984 клк (WW). Ее максимальное значение — на белых СД в связи с относительной (по сравнению с другими спектрами) близостью к кривой спектральной чувствительности глаза человека. Энергетическая облученность от ФО варьирует от 14.5 (WW) до 28.6 Вт·м⁻² (BB), ее максимальное значение на синих СД определяется наибольшей энергетичностью фотонов в более коротковолновом диапазоне.

Значения энергоемкостей варьируют для ε_I — от 1.02 (WW) до 1.04 В·А·Вт⁻¹ (RR); ε_{II} — от 1.08 (RR) до 1.09 отн.ед. (WW); ε_{III} — от 0.45 (RR) до 1.32 Дж·мкмоль⁻¹ (WW); ε_o — от 0.50 (RR) до 1.46 В·А·мкмоль⁻¹·с (WW). Закономерности

формирования величин энергоемкости отдельных ВЭБ определяются сочетаниями значений их входных и выходных величин на различных группах СД.

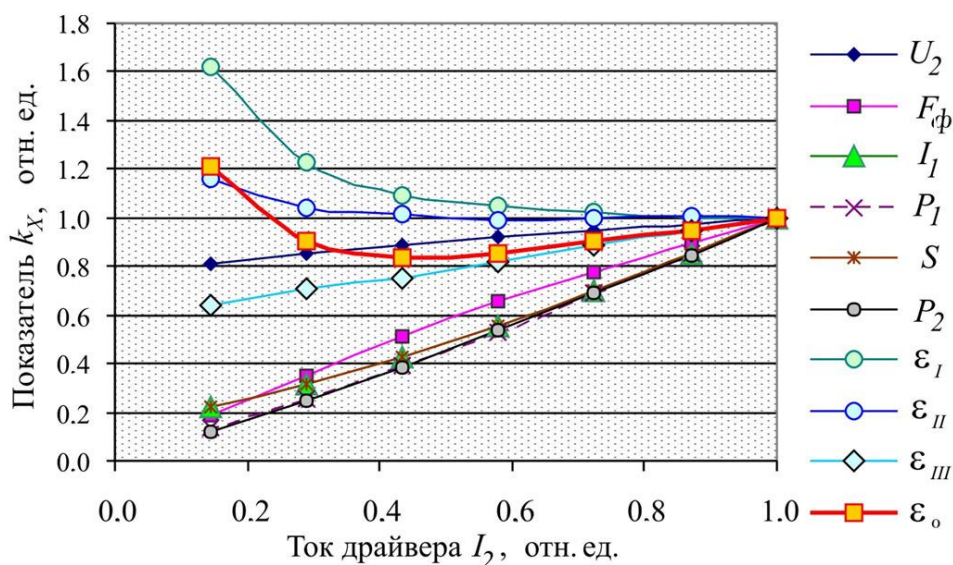
Параметры ФО при регулировании тока драйвера

Испытания на режимах, в которых включены СД одного типа, с учетом их последовательно включенного количества 45 шт, позволили определить характеристики единичных СД. Для синего СД падение напряжения составляет 3.60 В, его мощность 2.48 Вт, фотонный поток 2.72 мкмоль·с⁻¹. Для белого СД падение напряжения составляет 3.47 В, его мощность 2.39 Вт, фотонный поток 1.81 мкмоль·с⁻¹. Для дальнекрасного СД падение напряжения составляет 2.20 В, его мощность 1.52 Вт, фотонный поток 3.41 мкмоль·с⁻¹. Полученные данные позволяют уточненно произвести выбор количества СД разных типов при проектировании специализированных ФО.

В табл. 2 представлены абсолютные значения измеряемых параметров при регулировании тока драйвера (сочетание WW).

Табл. 2. Значения измеряемых параметров при регулировании тока драйвера

I_2 , А	U_2 , В	F_Φ , мкмоль·с ⁻¹	I_1 , А	P_1 , Вт	S , В·А	P_2 , Вт	ε_I , В·А·Вт ⁻¹	ε_{II} , отн. ед.	ε_{III} , Дж× ×мкмоль ⁻¹	ε_o , В·А·мкмоль ⁻¹ ·с
0.69	155	81.40	0.54	117.0	118.8	107.0	1.015	1.087	1.322	1.459
0.60	151	73.09	0.46	99.5	101.2	90.6	1.017	1.098	1.240	1.385
0.50	147	63.13	0.38	80.5	83.6	73.5	1.039	1.095	1.164	1.324
0.40	143	53.16	0.30	62.0	66.0	57.2	1.065	1.084	1.076	1.242
0.30	137	41.53	0.23	45.5	50.6	41.1	1.112	1.107	0.990	1.218
0.20	132	28.24	0.17	30.0	37.4	26.4	1.247	1.136	0.935	1.324
0.10	126	14.95	0.12	16.0	26.4	12.6	1.650	1.270	0.843	1.766

**Рис. 6.** Зависимости измеряемых параметров от тока драйвера.

На рис. 6 показаны зависимости измеряемых параметров от тока драйвера в относительных единицах (сочетание WW).

При уменьшении тока драйвера от максимального значения 0.69 А до 0.1 А наблюдалось линейное (для некоторых величин, практически линейное) уменьшение напряжения во вторичной цепи драйвера U_2 (на 19%); фотонного потока F_Φ (на 82%); тока в первичной цепи I_1 (на 78%); активной P_1 (на 86%) и полной S (на 78%) мощности в первичной цепи; мощности во вторичной цепи P_2 (на 88%). Это приводит к нелинейному увеличению энергоемкости ε_I (на 63%) и ε_{II} (на 17%). Энергоемкость ε_{III} при этом достаточно

линейно снижается (на 36%). Такие разнонаправленные тенденции изменения энергоемкости ВЭБ формируют экстремальный характер итоговой кривой $\varepsilon_o(I_2)$. При снижении питающего СД тока до значения 0.3 А ε_o снижается на 17%. При большем снижении тока ε_o увеличивается на 21%. Таким образом, с точки зрения энергосбережения, оптимальным является эксплуатация ФО при токе $I_2 = 0.3$ А, при котором наблюдается минимальное значение энергоемкости ФО $\varepsilon_o = 1.218 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{мкмоль}^{-1} \cdot \text{с}$.

На рис. 7 показаны кривые нагрева радиатора при включении некоторых групп СД при температуре окружающей среды 22.5 °С. У исследуемого ФО масса радиатора $m = 3.51$ кг, эквивалентная

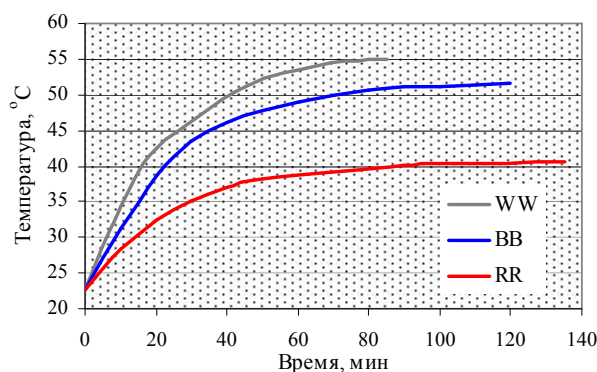


Рис. 7. Кривые нагрева радиатора.

площадь поверхности $S_{\text{пов}} = 0.3$ м, средние значения постоянной нагрева $\tau = 23$ мин, термического сопротивления $R_{\text{th}} = 0.45$ К·Вт⁻¹, коэффициента теплоотдачи $\alpha = 7.4$ Вт·м⁻²·К⁻¹. Перепады температур между окружающей средой и установившейся температурой радиатора при включении различных групп СД различны: $\Delta T^{\text{WW}} = 32.3$ °C (максимальное значение), $\Delta T^{\text{BB}} = 29.0$ °C, $\Delta T^{\text{RR}} = 17.9$ °C (минимальное значение).

Эта закономерность соответствует величинам мощности, идущей на нагрев радиатора: $P_{\text{н}}^{\text{WW}} = 83.2$ Вт, $P_{\text{н}}^{\text{BB}} = 59.8$ Вт, $P_{\text{н}}^{\text{RR}} = 36.9$ Вт, и мощности, идущей на излучение: $P_{\text{е}}^{\text{WW}} = 24.4$ Вт, $P_{\text{е}}^{\text{BB}} = 52.0$ Вт, $P_{\text{е}}^{\text{RR}} = 31.4$ Вт, в свою очередь объясняемым различной фотонной отдачей применяемых СД (по данным табл. 1: $\eta_{\text{ф}}^{\text{WW}} = 0.76$ мкмоль·Дж⁻¹, $\eta_{\text{ф}}^{\text{BB}} = 1.10$ мкмоль·Дж⁻¹, $\eta_{\text{ф}}^{\text{RR}} = 2.25$ мкмоль·Дж⁻¹).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный ФО обеспечивает возможность достаточного для практики точного регулирования спектра излучения, автоматического включения в зависимости от времени суток и уровня естественной освещенности и пригодного для облучения как рассады, так и длинностебельных растений. ФО содержит корпус, радиатор, управляемый драйвер, синие, дальнекрасные и белые светодиоды, защитное покрытие, сетевой кабель, герметичный ввод, герметичный разъем, потенциометр, выключатель, первый и второй переключатели, реле времени, реле освещенности, датчик естественной освещенности, первую и вторую проуши-

ны. Применен новый компоновочный принцип: равномерно распределенные по теплоотводящей поверхности разноспектральные светодиоды объединены в отдельные электрические группы, коммутируемые в целях получения необходимого спектрального состава потока излучения.

Разработанные конструктивные решения, апробированный компоновочный принцип, предложенная методика экспериментальных исследований и уточненные значения параметров отдельных типов СД позволяют производить конструирование ФО под специфические требования для их использования как в исследовательских лабораториях, так и в малых тепличных хозяйствах и частном секторе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Соколов А.В. Оптимизация спектрального состава и энергетической эффективности фитооблучателей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 1 (34). С. 53–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37751516>
2. Бурынин Д.А., Смирнов А.А. Обзор источников освещения для тепличных хозяйств и фабрик растений // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 1 (42). С. 105–113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44927415>
3. Katzin D., Marcelis L.F.M., van Mourik S. Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting // Applied Energy. 2021. Vol. 281, no. 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116019
4. Былков Д.В., Полторацкий Д.А., Солдаткин В.С., Лазарева А.О., Шкарупо А.П., Щепеткин Е.С. Сравнение влияния облучательных приборов на рост и урожайность на примере огурцов сорта Мева F1 // Фотоника. 2023. Т. 17, № 5. С. 408–419. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.5.408.418
5. Ерохин М.М., Камшилов П.В., Терехов В.Г., Туркин А.Н. Исследование характеристик светодиодов для фитооблучателей // Светотехника. 2019. № 5. С. 42–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41272965>
6. Закурин А.О., Щенникова А.В., Камюнская А.М. Светокультура растениеводства защищенного грунта: фотосинтез, фотоморфогенез и перспективы применения светодиодов // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 3. С. 246–258. DOI: 10.31857/S0015330320030227
7. Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Довлатов И.М., Соколов А.В., Качан С.А. Разработка фитооблучателей на основе светодиодов с настраиваемым соотношением спектра ФАР // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 4. С. 247–254. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41509756>
8. Карли Н., Сперлинг А., Бизяк Г. Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света // Светотехника. 2019. № 5. С. 13–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41272960>

9. Кулешова Т.Э., Блашенков М.Н., Кулешов Д.О., Галль Н.Р. Разработка лабораторного фитотрона с возможностью варьирования спектра излучения и длительности суточной экспозиции и его биологическое тестирование // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 3. С. 35–43.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26493458>
10. Ракутько С.А. Становление и развитие энергоэкологии светокультуры как нового научного направления в Институте агроинженерных и экологических проблем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 2 (74). С. 331–346. URL: <https://izvestiavolga.elpub.ru/jour/article/view/267>
11. Калабкин А.А., Кузнецов Е.А., Ивлиев С.Н., Аирияттов А.А., Калабкин В.А., Мусатов А.С. Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 585–598. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202304.585-598
12. Литвиненко В.Г., Мантула В.Д., Каневский А.Л., Андреева Т.А., Юхнов В.Ю. Оценка энергоэффективности производства на основе анализа сквозной энергоемкости продукции // Экология и промышленность. 2009. № 2 (19). С. 47–53.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46668897>
13. Ракутько С.А., Гулин С.В. Применение метода конечных отношений к энергетическому анализу этапов технологического процесса облучения в оптических электротехнологиях // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2024. № 1 (75). С. 141–150.
URL: <https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/#>
14. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Энергетическая оценка эффективности балластов для газоразрядных источников света // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1 (73). С. 373–381 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=64902338>
15. Ракутько С.А., Медведев Г.В., Ракутько Е.Н. Влияние отклонения напряжения питания на характеристики люминесцентных ламп // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1 (118). С. 149–160. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-1118-149-160
16. Ракутько С.А. Прикладная теория энергосбережения: научные основы, применение в агроинженерном образовании. Монография. СПб.: ЛЕМА, 2024. 254 с.
17. Серебряков А.С., Осокин В.Л. Активные и неактивные мощности в цепях переменного тока с неуправляемыми нелинейными элементами // Вестник ВИЭСХ. 2017. № 3 (28). С. 21–26.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30647963>

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация (Ракутько Е.Н., Ракутько С.А.)

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация (Медведев Г.В., Гулин С.В.)

Контакты: Ракутько Сергей Анатольевич,
sergej1964@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 12.05.2025

DEVELOPMENT AND LABORATORY TESTING OF A LED PHYTO-IRRADIATOR

E. N. Rakutko¹, S. A. Rakutko¹, G. V. Medvedev², S. V. Gulin²

¹*Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) –
branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia*

The issue of energy saving in optical electrotechnologies is important for modern LED-based phyto-irradiators, which have now definitely found their niche in indoor plant lighting. Such devices have several specific features that need to be considered when designing and analysing them. The phyto-irradiator developed is primarily intended for experimental studies on the energy and environmental aspects of indoor plant lighting. It may be also used in the private sector and in small greenhouses for the irradiation of both seedlings and long-stemmed plants. The aim of the study was to design a simple device that could regulate the radiation spectrum accurately enough for practical applications and that could be switched on automatically according to the time of day and the level of natural light. The phyto-irradiator uses a new design principle. Multi-spectral LEDs are evenly distributed over the heat-dissipating surface and combined into separate electrical groups that are switched to achieve the required light quality of the radiation flux. Experimental data was obtained by measuring spectral, photometric, electrical and thermal characteristics of the device. The results confirmed the effectiveness of the developed phyto-irradiator. It combines the accuracy of light quality control with energy efficiency.

Keywords: indoor plant lighting, energy saving, phyto-irradiator, LED, energy consumption

REFERENCES

1. Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Sokolov A.V. [Optimization of spectral composition and energy efficiency of led horticultural lighting systems]. *Ehlektrotekhnologii i ehlektrooborudovanie v APK* [Electrical engineering and electrical equipment in agriculture], 2019, no. 1 (34), pp. 53–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37751516> (In Russ.).
2. Burynin D.A., Smirnov A.A. [Overview of the grow lights used in greenhouses and plant factories]. *Ehlektrotekhnologii i ehlektrooborudovanie v APK* [Electrical engineering and electrical equipment in agriculture], 2021, vol. 68, no. 1 (42), pp. 105–113. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-105-113 (In Russ.).
3. Katzin D., Marcelis L.F.M., van Mourik S. Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 2021, vol. 281, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116019
4. Bylkov D.V., Poltoratskiy D.A., Soldatkin V.S., Lazareva A.O., Shkarupo A.P., Shchepetkin E.S. [Comparison of the Influence of Irradiation Devices on Growth and Yield by the Example of Mewa F1 Cucumbers]. *Fotonika* [Photonics Russia], 2023, vol. 17, no. 5, pp. 408–419. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.5.408.418 (In Russ.).
5. Erokhin M.M., Kamshilov P.V., Terekhov V.G., Turkin A.N. [Study of characteristics of LEDs for phyto-irradiators]. *Svetotekhnika* [Light & Engineering], 2019, no. 5, pp. 42–48. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41272965>
6. Zakurin A.O., Shchennikova A.V., Kamionskaya A.M. [Artificial-light culture in protected ground plant growing: photosynthesis, photomorphogenesis, and prospects of LED application]. *Fiziologiya rastenii* [Russian Journal of Plant Physiology], 2020, vol. 67, no. 3, pp. 246–258. DOI: 10.31857/S0015330320030227 (In Russ.).
7. Smirnov A.A., Proshkin Y.A., Dovlatov I.M., Sokolov A.V., Kachan S.A. [Development of phyto radiators based on LEDs with adjustable spectral composition of PAR]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve* [Innovations in agriculture], 2019, no. 4, pp. 247–254. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41509756>
8. Carli N., Sperling A., Biziak G. [Implementation of a laboratory sample of a tunable multicolor light source]. *Svetotekhnika* [Light & Engineering], 2019, no. 5, pp. 13–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41272960> (In Russ.).
9. Kuleshova T.E., Blashenkov M.N., Kuleshov D.O., Gall N.R. [Development and biological testing of the laboratory phytotron with possibility of varying the emission spectra and the daily exposure]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 3, pp. 35–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26493458> (In Russ.).
10. Rakutko S.A. [Formation and development of energy and ecology convergence in greenhouse horticulture as a new scientific field at the institute of agricultural engineering and environmental problems]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and higher vocational education], 2024, no. 2 (74), pp. 331–346. URL: <https://izvestiavolga.elpub.ru/jour/article/view/267> (In Russ.).
11. Kalabkin A.A., Kuznetsov E.A., Ivliyev S.N., Ashryatov A.A., Kalabkin V.A., Musatov A.S. [The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation].

- Inzhenernye tekhnologii i sistemy* [Engineering Technologies and Systems], 2023, vol. 33, no. 4, pp. 585–598. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202304.585-598 (In Russ.).
12. Litvinenko V.G., Mantula V.D., Kanevsky A.L., Andreeva T.A., Yuhnov V.Yu. [Evaluation of productive energy efficiency by analyzing through energy consumption of products]. *Ehkologiya i promyshlennost'* [Ecology and industry], 2009, no. 2 (19), pp. 47–53. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46668897>
 13. Rakutko S.A., Gulin S.V. [Application of the finite ratio method to energy analysis of irradiation process steps in optical electrotechnologies]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University], 2024, no. 1 (75), pp. 141–150. (In Russ.). URL: <https://spbgau.ru/life/newspaper/zhurnal-izvestiya/#>
 14. Rakutko E.N., Rakutko S.A. [Energy assessment of the efficiency of ballasts for gas-discharge light sources]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and higher vocational education], 2024, no. 1 (73), pp. 373–381. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=64902338>
 15. Rakutko S.A., Medvedev G.V., Rakutko E.N. [Influence of supply voltage deviation on the characteristics of fluorescent lamps]. *AgroEhkoInzheneriya* [AgroEcoEngineering], 2024, no. 1 (118), pp. 149–160. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-1118-149-160 (In Russ.).
 16. Rakutko S.A. *Prikladnaya teoriya ehnergosberezheniya: nauchnye osnovy, primeneniye v agroinzhenernom obrazovanii. Monografiya* [Applied theory of energy saving: scientific bases, application in agro-engineering education. Monograph]. Saint Petersburg, LEMA Publ., 2024. 254 p. (In Russ.).
 17. Serebryakov A.S., Osokin V.L. [Active and inactive powers in AC circuits with uncontrolled nonlinear elements]. *Vestnik VIEHSKH* [VIESH Bulletin], 2017, no. 3 (28), pp. 21–26. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30647963>

Contacts: *Rakutko Sergei Anatolievich*,
 sergej1964@yandex.ru

Article received by the editorial office on 12.05.2025

INTRODUCTION

Light-emitting diodes (LEDs) have now confidently occupied their niche in photoculture. Irradiators used in growing plants (phytoirradiators, PI) have a number of features that require consideration during analysis, calculation, and implementation of designs based on them. The use of LEDs in PIs, all other things being equal, allows for a significant reduction in their power consumption compared to traditional irradiators [1]. The advent of LED PIs has led to significant technological changes in plant growing. It has become possible to create effective "recipes" for growing plants by adjusting the spectrum of photosynthetically active radiation for each species or variety [2]. As one of the most efficient and energy-efficient technical methods of giving plants light with the right spectral composition, modern PIs are tailored for greenhouse cultivation [3].

The lighting characteristics of fluorescent lamps directly affect the growth and productivity of plants [4]. Flexibility in controlling the radiation spectrum is of key importance for optimizing phytoirradiation at different stages of plant growth and for different types of crops. Different combinations of spectral ranges are required at different periods of plant growth to stimulate certain physiological processes: photosynthesis, flowering, and fruit formation. Each spectral range is significant in its own way and is necessary for the successful development of plants. Fluorescent lamps based on LEDs emitting in the most photosynthetically active spectral ranges are widely used: blue (400–500) and red (600–700 nm) [5]. In the blue range, chlorophyll synthesis is initiated, it plays an important role in photomorphogenic changes in plants, including stem elongation and leaf growth: it is an important component for phototropism and stomatal aperture, and promotes an increase in chlorophyll content. The red range is the main one for growing agricultural crops at most stages of growth and development. It is the most energetically efficient for stimulating photosynthesis. Radiation in the far-red range (700–800 nm) causes shade avoidance syndrome associated with internode elongation, promotes an increase in leaf area and flowering, and stimulates the accumulation of phytonutrients. When using far-red radiation in combination with shorter wavelengths, synergistic stimulation of plant development occurs (the "Emerson enhancement effect") [6]. Green (500–600 nm), yellow (540–570 nm) and orange (570–600 nm) LEDs have lower photosynthetic efficiency, and some researchers consider their use in photosynthesis inappropriate [7]. In addition to colored LEDs emitting in different narrow ranges of the visible spectrum, white light LEDs emitting in a wide range (400–700 nm) are used in PI. Their use is possible throughout the main growth period [8]. A combination of different types of

LEDs provides a more precise selection of radiation of different spectra for different plant species.

PIs usually developed for photoculture are focused primarily on providing the most favorable growth and development conditions for plants [9]. However, their functionality is insufficient in ecological studies to create and reproduce conditions of controlled stress. In studies on the energy ecology of photoculture, such modes are important for developing bioindication methods, creating instrumentation for research, and expanding the range of measured values by controlled changes in the plant phenotype [10].

The aim of this work is to develop and test an experimental LED-based PI that allows varying the spectral composition of radiation, irradiance, and photoperiod in studies of the influence of stress conditions in photoculture.

STATEMENT OF THE PROBLEM

The main area of application of the developed PI is experimental studies on the energy ecology of photoculture. It is possible to use the PI in the private sector and small greenhouses. In this regard, the task is to create a simple device that provides the ability to accurately regulate the radiation spectrum, which is sufficient for practice, automatic switching on depending on the time of day and the level of natural illumination, and is suitable for irradiating both seedlings and long-stemmed plants. The spectral composition of the radiation should have a stress-inducing effect on plants to the maximum extent, affecting their phenotype. This requirement is met by the extreme ranges of optical radiation — blue and far-red. The presence of white is necessary for maintenance work, as well as a basis for adding narrow-spectrum radiation. For ease of use, step-by-step regulation of the spectrum is implemented by switching groups of LEDs.

PHYTO-IRRADIATION COMPOSITION

The control unit 1 is placed in plastic and is a sealed box attached to a radiator 2 made of a finned aluminum profile in its upper part when the radiator is located horizontally (Fig. 1). The supply voltage to the housing is supplied using a network cable 8 through a sealed input 9. The housing is shifted to one of the ends of the radiator.

The first eye 18 is attached to the same end, the second eye 19 is attached closer to its other end in the plane of the radiator, opposite to the surface of the LED block location. The eyes are attached to the radiator by a hinge, with the ability to rotate by 90°, which ensures the suspension of the PI in horizontal and vertical positions. Groups of LEDs are attached to

the lower part of the radiator. The LED block is covered with a protective coating 7. The natural light sensor 17 is attached to the first eye perpendicular to it, which ensures a horizontal plane of the light-perceiving surface of the sensor for any position of the PI in space.

Fig. 1. The layout of the phyto-irradiator.

1 — control unit; 2 — radiator; 3 — adjustable driver; 4, 5, 6 — blue, white, and far-red LEDs; 7 — protective coating; 8 — network cable; 9 — sealed input; 10 — sealed connector; 11 — potentiometer; 12 — breaker; 13, 14 — first and second switches; 15 — time relay; 16 — illumination relay; 17 — natural light sensor; 18, 19 — first and second eyes

The electrical circuit of the PI (Fig. 2) is formed by the primary and secondary circuits of the driver 3, the regulation of the secondary current of which is carried out by the potentiometer 11. The primary circuit is connected to the 220 V network. In it, the contacts of the breaker 12, the time relay 15 and the illumination relay 16, connected to the natural light sensor 17, are connected in series. The contacts of the primary circuit have an output to the sealed connector 10. The secondary circuit of the controlled driver is formed by the series-connected contacts of the first switch 13, parallel-connected groups of LEDs, and the contacts of the second switch 14. The LEDs of individual groups are connected in series in their electrical circuits. The positions of the switches for selecting groups of LEDs 4, 5 and 6 are marked with the symbols B (Blue), W (White) and R (far Red), respectively. All groups of LEDs at a point corresponding to two-thirds of the total number of LEDs in group N at one end and one-third at the other are electrically connected to each other by jumper n . The LEDs are arranged on the radiator in three lines, LEDs with one emission spectrum alternate in width and length of the PI.

Fig. 2. Schematic diagram of the PI.

The numbers of the elements correspond to the numbers in Fig. 1

The required spectral composition of the emission is set by the position of the handles of switches 13 and 14 (two switches for three positions, a total of nine spectrum combinations are realized). Potentiometer 11 sets the current supplying the LEDs in the secondary circuit of driver 3, on which the intensity of the photon flux emitted by the LEDs depends. Switch 13 sets 2/3 of the flux of the selected range, switch 14 — 1/3 of the flux. Depending on the required position of the

PI in space, the first 18 and second 19 eyes are used for its suspension — for horizontal position — or only the first 18 — for vertical position. Using the time relay 15, the moments of switching the PI on and off are set. The voltage is supplied to the circuit using the breaker 12. At a low level of natural illumination, measured by the sensor 17, the contact of the illumination relay 16 is closed. Through the sealed connector 10 it is possible to connect additional light sources or other electrical equipment.

In the manufactured prototype of the PI, an aluminum profile with fins was used as a radiator, the length of the platform for the LED unit is 990 mm. All the LEDs were arranged in three lines of 45 pcs. each on aluminum heat sinks of the Star type. The heat sinks were fastened to the radiator with M3 bolts using thermal paste. The distance between the fastening points of the heat sink is 21 mm. The indentation of the line from the end of the PI is 22.5 mm. One bolt simultaneously fastens two heat sinks from their opposite sides. The protective coating 7 is made of transparent plastic 2 mm thick.

An adjustable driver of the ИИС120-700 ТУ IP67 1202 brand was used. The maximum current of the secondary circuit of the driver was 0.69 A, the voltage range was 85–172 V. Three-watt LEDs made in China were used.

METHODOLOGY OF OBTAINING EXPERIMENTAL DATA

The study of the PI was carried out on a laboratory bench, the electric power of which was carried out through a Б2-3 stabilizer, ensuring the instability of the output voltage of no more than 1% when the network voltage changed by 10%.

The spectral composition of the radiation was determined using a UPRtek MK350N spectrometer. We saved the spectral images in relative units in graphic files and the absolute values of the spectral density of the energy irradiance E_λ [$\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1}$] at individual wavelengths in the range of 380–780 nm with a step of 1 nm — in xls format. The energy irradiance E_e [W m^{-2}] was determined by summing the obtained readings

$$E_e = \sum_{380}^{720} E_\lambda 10^{-3}. \quad (1)$$

The integral photon irradiance E_ϕ [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] was determined by the formula in accordance with [11]

$$E_\phi = \sum_{380}^{780} \frac{\lambda \cdot E_\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} 10^{-6}, \quad (2)$$

where h is Planck's constant, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s; c is the speed of light, $c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹; N_A is Avogadro's number, $N_A = 6.023 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹.

Illumination E_c was measured using a TKA lux meter. The spectrometer and lux meter sensors were placed opposite the center of the PI, at a distance of 50 cm.

The photon flux F_ϕ [$\mu\text{mol s}^{-1}$] was determined indirectly by summing up the contribution of each LED to the measured photon irradiance E_ϕ under the assumption of a cosine law for the spatial distribution of the emitted flux.

The electrical characteristics (voltages, currents, active power) were measured by astatic devices of accuracy class 0.5. A wattmeter with nominal values of 5 A and 150 V was used with an И54 current transformer (accuracy class 0.2, transformation ratio 0.1). The value of the voltage supplying the circuit was set by a laboratory variable autotransformer and controlled by a Д566 voltmeter of accuracy class 0.2. The parameters of the PI were measured when switching on various groups of LEDs, as well as WW groups when changing the driver current I_2 . In relative quantities, the parameter values were determined by the formula

$$k_X = X_\phi / X_n, \quad (3)$$

where X_ϕ , X_n are the actual and nominal (at the maximum driver current $I_2 = 0.69$ A) values of the indicator in the corresponding physical units, respectively.

To analyze the energy characteristics of the PI as an object of study, the principle of end-to-end energy analysis was used [12], which has proven itself well in studying the stages of the technological process of irradiation in optical electrical technologies [13], in particular, in analyzing the operation of the circuit of gas-discharge lamps with ballasts of various types [14], in studying the efficiency of lamps operating under conditions of supply voltage deviation [15].

Fig. 3 shows the basic electrical circuit for switching on the PI (measuring instruments are not shown).

Fig. 3. Scheme for analyzing the energy efficiency of the PI

The layout of the circuit for conducting energy analysis is made, which consists of identifying VEB (virtual energy blocks) corresponding to the stages of energy conversion [16]. In the case under consideration, BЭБ_I is an abstraction of the electrical circuit

connecting the driver to the power supply network I , BЭБ_{II} — driver 2, BЭБ_{III} — LED 3. The set of these blocks represents a total BЭБ₀.

The energy Q_0^h consumed from the electrical network is fed to the BЭБ_I input ($Q_I^h = Q_0^h$). This energy corresponds to the total power S [V A] of BЭБ_I, determined by the readings of the voltmeter measuring the network voltage U_c and the ammeter measuring the consumed current I_I .

At the BЭБ_I output, the energy Q_I^k , corresponding to the active power P_I [W] consumed by the driver and measured by the wattmeter is recorded. The nature of the energy losses ΔQ_I at this stage lies in the non-sinusoidal nature of the instantaneous values of current I_I and voltage U_c [17].

The value of these losses

$$\Delta Q_I = Q_I^h - Q_I^k. \quad (4)$$

The BЭБ_I energy capacity [V A W⁻¹] is

$$\varepsilon_I = \frac{Q_I^h}{Q_I^k} = \frac{S}{P_I} = \frac{U_c I_I}{P_I}. \quad (5)$$

The useful energy Q_I^k from the BЭБ_I output goes to the BЭБ_{II} input ($Q_{II}^h = Q_I^k$). At the BЭБ_{II} output, the energy Q_{II}^k is recorded; it corresponds to the active power P_2 [W] in the output DC circuit of the driver and is determined by the readings of the voltmeter measuring the voltage U_2 generated by the driver and the ammeter measuring the operating current of the LED I_2 . At this stage, the energy losses ΔQ_{II} depends on the efficiency of the driver. The magnitude of these losses

$$\Delta Q_{II} = Q_{II}^h - Q_{II}^k. \quad (6)$$

BЭБ_{II} energy capacity [relative units] is

$$\varepsilon_{II} = \frac{Q_{II}^h}{Q_{II}^k} = \frac{P_I}{P_2} = \frac{U_c I_I}{U_2 I_2}. \quad (7)$$

Then the useful energy Q_{II}^k from the BЭБ_{II} output goes to the BЭБ_{III} input ($Q_{III}^h = Q_{II}^k$). At its output, the energy Q_{III}^k corresponding to the photon flux F_ϕ [$\mu\text{mol s}^{-1}$] is recorded. The losses at this stage ΔQ_{III} are determined by the degree of perfection of the LEDs used. The magnitude of these losses

$$\Delta Q_{III} = Q_{III}^h - Q_{III}^k. \quad (8)$$

BЭБ_{III} energy capacity [J μmol^{-1}] is

$$\varepsilon_{III} = \frac{Q_{III}^u}{Q_{III}^k} = \frac{P_2}{F} = \frac{U_2 I_2}{F}. \quad (9)$$

The reciprocal value of the found energy capacity is the photon return η_ϕ [$\mu\text{mol J}^{-1}$].

Total energy capacity of БЭБ₀ [$\text{V A } \mu\text{mol}^{-1} \text{ s}$]

$$\varepsilon_o = Q_o^u / Q_o^k = \varepsilon_I \varepsilon_{II} \varepsilon_{III}. \quad (10)$$

Total energy losses

$$\Delta Q_o = Q_o^u - Q_o^k = \Delta Q_I + \Delta Q_{II} + \Delta Q_{III}. \quad (11)$$

The thermal characteristics of the PI were determined by measuring the change in radiator temperature in 10-min increments using an Evco temperature controller with an NTC sensor. The sensor was placed inside the radiator, in the middle of its length, in contact with the radiator plate, on which the LEDs were fixed on the outside. From the transient process, the thermal constant τ [s] was determined as the time during which the radiator heats up by 63% of the steady-state temperature difference ΔT [K].

Thermal resistance R_{th} [K W^{-1}]

$$R_{th} = \frac{\tau}{cm}, \quad (12)$$

where c is the specific heat capacity (for aluminum $c = 881 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); m is the mass of the radiator, kg.

Heating power, P_{II} [W]

$$P_{II} = \frac{\Delta T}{R_{th}}. \quad (13)$$

Power spent on radiation, P_e [W]

$$P_e = P_2 - P_{II}. \quad (14)$$

Heat transfer coefficient a [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

$$a = \frac{P_{II}}{S \Delta T}, \quad (15)$$

where S is the equivalent surface area of the radiator, m^2 .

Experimental data were processed using the EXCEL package.

RESULTS AND DISCUSSION

PI spectra

Figure 4 shows the emission spectra (in relative units) for different combinations of switches 13 and 14, commuting different groups of LEDs.

The percentage spectral ratios of energy in individual ranges — blue (b), green (g), red (r), far-red

(fr) — in relation to the total emitted energy are also indicated.

Fig. 4. Emission spectra when different groups of LEDs are turned on. Spectrum intervals: b — blue, g — green, r — red, fr — far-red

In the case of the BB combination (only blue LEDs), the emission spectrum is a narrow peak at a wavelength of 433 nm and a width at half the amplitude of 22 nm. Almost all the energy is emitted in the blue range. For the RR combination (far-red LEDs only), the emission spectrum is a narrow peak at a wavelength of 729 nm and a width of 38 nm. The main part of the energy (90.6%) is emitted in the far-red region, 8.9% in the red region. When the WW groups (white LEDs only) turned on, the emission spectrum is a combination of a narrow peak at a wavelength of 452 nm and a width of 32 nm (14.0% of the energy) and an emission region with a maximum at a wavelength of 584 and a width of 120 nm, covering the green (45.9% of the energy) and red (35.8% of the energy) regions of the spectrum. The RB and BR combinations make it possible to obtain spectra in which the energy ratios in the blue and far-red ranges are 28.4 : 64.9% and 60.5 : 35.7%, respectively. There is virtually no radiation in the green and red ranges. The WB and BW combinations allow us to obtain spectra in which the energy ratios in the blue, green, and red ranges are 49.6 : 26.6 : 21.1% and 76.8 : 12.3 : 9.7%, respectively. There is virtually no radiation in the far-red range. The RW and WR combinations allow us to obtain spectra in which the energy ratios in the green, red, and far-red ranges are 10.2 : 14.9 : 71.9% and 24.2 : 23.1 : 45.9%, respectively. There is virtually no radiation in the blue range.

Figure 5 shows the spectral density of photon irradiance in absolute units for various combinations of switch positions. In absolute units, the spectral density of photon irradiance for the BB combination is $4.05 \mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{nm}$, RR — $3.10 \mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{nm}$, WW — $0.46 \mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{nm}$. This determines the different values of the integral photon flux of the groups.

Fig. 5. Spectral density of photon irradiance when switching on different groups of LEDs.

Parameters of the PI for different combinations of LED groups

The results of measuring the PI parameters at a line voltage $U_c = 220 \text{ V}$ and a maximum current in the

secondary driver circuit of $I_2 = 0.69$ A for different combinations of LED groups are shown in Tab. 1. The consumed current varies in the range from 0.35 (RR) to 0.56 A (BB); the consumed active power is from 74.0 (RR) to 121.0 W (BB); voltage in the secondary driver circuit — from 99.0 (RR) to 162.0 V (BB); power in the secondary driver circuit — from 68.3 (RR) to 111.8 W (BB); total power — from 77.0 (RR) to 123.2 VA (BB). The numerical values of these electrical parameters take minimum values for groups of red LEDs and maximum values for groups of blue LEDs.

Tab. 1. Parameters of the PI for different combinations of LED groups.

The photon flux varies from 81.4 (WW) to 153.4 $\mu\text{mol s}^{-1}$ (RR); the photon yield — from 0.76 (WW) to 2.25 $\mu\text{mol J}^{-1}$ (RR); the photon irradiance — from 69.1 (WW) to 130.3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (RR). Thus, the emissivity of the photic reflector is minimal for white LEDs and maximal for red LEDs. The illumination created by the photic reflector varies from 0.093 (RR) to 4.984 klx (WW). White LEDs have the maximum value due to the relative (compared to other spectra) proximity to the spectral sensitivity curve of the human eye. The energy irradiance from the PI varies from 14.5 (WW) to 28.6 W m^{-2} (BB), its maximum value of blue LEDs is determined by the highest energy of photons in the shorter-wave range.

The values of energy capacities vary for ε_I — from 1.02 (WW) to 1.04 VA W^{-1} (RR); ε_{II} — from 1.08 (RR) to 1.09 rel. units (WW); ε_{III} — from 0.45 (RR) to 1.32 $\text{J} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ (WW); ε_o — from 0.50 (RR) to 1.46 VA $\cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{s}$ (WW). The patterns of formation of the values of energy capacity of individual БЭБ are determined by combinations of the values of their input and output quantities of different groups of LEDs.

PI parameters during regulation driver current

Tests in modes in which LEDs of the same type are turned on, taking into account their series-connected quantity of 45 pcs, allowed us to determine the characteristics of individual LEDs. For the blue LED, the voltage drop is 3.60 V, its power is 2.48 W, and the photon flux is 2.72 $\mu\text{mol s}^{-1}$. For the white LED, the voltage drop is 3.47 V, its power is 2.39 W, and the photon flux is 1.81 $\mu\text{mol s}^{-1}$. For the far-red LED, the voltage drop is 2.20 V, its power is 1.52 W, and the photon flux is 3.41 $\mu\text{mol s}^{-1}$. The obtained data allow us to more accurately select the number of LEDs of different types when designing specialized PI.

Table 2 presents the absolute values of the measured parameters when regulating the driver current (combination WW).

Tab. 2. Values of measured parameters when regulating the driver current

Figure 6 shows the dependences of the measured parameters on the driver current in relative units (WW combination).

Fig. 6. Dependences of measured parameters on driver current.

With a decrease in the driver current from the maximum value of 0.69 A to 0.1 A, a linear (for some values, almost linear) decrease was observed in the voltage in the secondary circuit of the driver U_2 (by 19%); photon flux F_ϕ (by 82%); current in the primary circuit I_1 (by 78%); active P_1 (by 86%) and total S (by 78%) power in the primary circuit; power in the secondary circuit P_2 (by 88%). This leads to a nonlinear increase in energy capacity ε_I (by 63%) and ε_{II} (by 17%). Energy capacity ε_{III} in this case decreases quite linearly (by 36%). Such multidirectional trends in the change in the energy capacity of the БЭБ form the extreme character of the final curve $\varepsilon_o(I_2)$. When the supply current of the LED decreases to 0.3 A, ε_o decreases by 17%. When the current decreases further, ε_o increases by 21%. Thus, from the energy saving point of view, the optimal option to operate the PI is a current value $I_2 = 0.3$ A, at which the minimum value of the LED energy capacity is observed = 1.218 V A $\mu\text{mol}^{-1} \text{s}$.

Figure 7 shows the radiator heating curves when some LED groups are turned on at an ambient temperature of 22.5 °C.

Fig. 7. Radiator heating curves.

The LED under study has a radiator mass $m = 3.51$ kg, an equivalent surface area $S_{\text{ноб}} = 0.3$ m, average heating constant values $\tau = 23$ min, thermal resistance $R_{\text{th}} = 0.45$ K W^{-1} , and a heat transfer coefficient $a = 7.4$ W $\text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$. The temperature differences between the environment and the steady-state temperature of the radiator when

different groups of LEDs are turned on are different: $\Delta T^{WW} = 32.3$ °C (maximum value), $\Delta T^{BB} = 29.0$ °C, $\Delta T^{RR} = 17.9$ °C (minimum value).

This pattern corresponds to the values of power spent on heating the radiator $P_{\text{H}}^{WW} = 83.2$ W, $P_{\text{H}}^{BB} = 59.8$ W, $P_{\text{H}}^{RR} = 36.9$ W, and the power spent on radiation: $P_{\text{e}}^{WW} = 24.4$ W, $P_{\text{e}}^{BB} = 52.0$ W, $P_{\text{e}}^{RR} = 31.4$ W, which in turn can be explained by different photon output of the LEDs used (according to Tab. 1: $\eta_{\phi}^{WW} = 0.76$ $\mu\text{mol J}^{-1}$, $\eta_{\phi}^{BB} = 1.10$ $\mu\text{mol J}^{-1}$, $\eta_{\phi}^{RR} = 2.25$ $\mu\text{mol J}^{-1}$).

CONCLUSION

The developed PI provides the possibility of precise regulation of the radiation spectrum, automatic switching on depending on the time of day and the level of natural illumination, and is suitable for irra-

diating both seedlings and long-stemmed plants. The PI contains a case, a radiator, a controlling driver, blue, far-red and white LEDs, a protective coating, a network cable, a sealed input, a sealed connector, a potentiometer, a breaker, the first and second switches, a time relay, a lighting relay, a natural light sensor, and the first and second eyes. A new layout principle is used: multi-spectral LEDs uniformly distributed over the heat-dissipating surface are combined into separate electrical groups, commuted in order to obtain the required spectral composition of the radiation flux.

The developed design solutions, the tested layout principle, the proposed methodology of experimental research and the specified values of the parameters of individual types of LEDs allow the design of PI to meet specific requirements for their use both in research laboratories and in small greenhouse farms and the private sector.