Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 76, № 2. С. 145–153.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья
УДК 629.12.066 **DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-76-16** **EDN: RDNTWB**

Исследование способов управления световым потоком путем регулирования напряжения на рыбопромысловых светильниках

Елена Петровна Матафонова
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
kafel302@mail.ru

Аннотация. Сравнительный анализ способов регулирования напряжения для управления световым потоком рыбопромыслового оборудования должен проводиться с учетом эффективности энергетических показателей судовой системы электроснабжения. С помощью регулировочных характеристик, математического анализа и компьютерного моделирования удобно изучать физические процессы, анализировать различные режимы работы оборудования, что позволяет использовать полученные данные для настройки системы управления. Регулируя напряжение светотехнического рыбопромыслового оборудования с помощью полупроводниковых устройств, можно значительно повысить эффективность вылова рыбных объектов, реагирующих на свет надводных и подводных источников.

Ключевые слова: регулирование светового потока, синхронный генератор, трансформатор, регулировочные характеристики, выпрямители, тиристорный трехфазный регулятор, светотехническое промысловое оборудование

Для цитирования: Матафонова Е. П. Исследование способов управления световым потоком путем регулирования напряжения на рыбопромысловых светильниках // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 76, № 2. С. 145–153.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 76, no. 2. P. 145–153.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

A study of methods for controlling luminous flux by regulating voltage on fishing lights

Elena P. Matafonova
Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
kafel302@mail.ru

Abstract. A comparative analysis of voltage regulation methods for controlling the light output of fishing equipment should be conducted taking into account the energy efficiency of the ship's power supply system. Using control characteristics, mathematical analysis, and computer modeling, it is convenient to study physical processes and analyze various equipment operating modes, allowing the obtained data to be used to adjust the control system. Regulating the voltage of fishing equipment using semiconductor devices can significantly improve the efficiency of catching fish species that respond to light from surface and underwater sources.

Keywords: luminous flux regulation, synchronous generator, transformer, control characteristics, rectifiers, three-phase thyristor regulator, fishing lighting equipment

© Матафонова Е. П., 2025

For citation: Matafonova E. P. A study of methods for controlling luminous flux by regulating voltage on fishing lights. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 76(2):145–153. (In Russ.).

Введение

Многочисленные исследования и эксперименты дальневосточных ученых ФГБНУ «ТИНРО-Центр» в области совершенствования промысловых устройств, значительно повышающих производительность промысла, которые применяются на крупнотоннажных и высокобортных траулерах, показали, что максимальный положительный эффект дает совместное использование в качестве промысловых кварцево-галогеновых ламп и светодиодных люстр с регулировкой светового потока. Это оборудование применяется и на других видах промысла, в том числе при добыче различных гидробионтов (тихоокеанского кальмара, камбалы и др.) с помощью подводного освещения [1].

Процесс привлечения рыбы в зону основного промыслового освещения зависит от комбинации светильников, их мощности, спектра излучающего света, а главное – от плавного регулирования параметрами светильников, которое осуществляется за счет изменения подводимого к светотехническому оборудованию напряжения и дискретного включения и выключения отдельных групп люстр. При промысле рыбонасосами также важно переключение напряжений, создающее «игру света».

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования рассматривается силовое оборудование крупнотоннажного траулера, входящее в состав судовой электроэнергетической системы, устройства для регулирования напряжения и светотехническое промысловое оборудование.

При написании работы использовались следующие методы: статистический, сравнения, математический анализ и компьютерное моделирование.

Результаты и их обсуждение

Привлечение косяков рыбы к борту сейнера-траулера осуществляется люстрами увеличенной мощности типа КГП –220 В 18 кВт, закрепленными на самой большой высоте, затем путем последовательного выключения бортовые светильники переводят косяк на другой борт в зону ловушки. При этом включают концентрирующие люстры специального спектра и заливающее устройство.

Таким образом, взаимодействие светового поля на лов рыбы широко используется в рыболовстве, эффективность привлечения и удержания рыбы повышается при определенном изменении характеристик источников света. При этом существуют различные оптимизированные энергетические и спектральные характеристики светотехнического оборудования, используемые для различных способов лова рыбы на свет.

Основная проблема, возникающая при работе силового оборудования, в частности, валогенератора, на световое промысловое оборудование заключается в неравномерном распределении нагрузки в связи с необходимостью регулировать световой поток с разных бортов (подключение люстр).

Самым простым способом регулирования нагрузки с номинальным напряжением 220 В является ее подключение через понижающий трансформатор от судовой сети на 380 В. При этом возможны различные способы регулирования напряжения на низкой обмотке (НН). На рис. 1 показаны возможные способы регулирования выходного напряжения трансформаторов.

Регулирование напряжения за счет подмагничивания части магнитопровода постоянным током можно осуществить трансформаторами или автотрансформаторами с подмагничиваемыми шунтами, передвижением дополнительной короткозамкнутой или вторичной обмотки и меняя положение магнитного шунта.

В любом случае широкодиапазонное регулирование напряжения изменением магнитной связи между обмотками трансформатора при работе его под нагрузкой создаст увеличение массы устройств в 2,5 раза, удельного габаритного объема в 1,3 раза и повысит падения напряжения на 12 % в обмотках и сердечнике по сравнению с обычным трансформатором соизмеримой мощности. Этот способ также практически неприемлем из-за увеличения коэффициента гармонических составляющих, который прямо пропорционален глубине регулирования и обратно пропорционален коэффициенту мощности, и из-за сложности конструкции такого трансформатора.

С целью уменьшения массы трансформатора при таком способе следует применять регулирование напряжения на низкой стороне, так как если регулировать число витков на первичной обмотке, то расчетная мощность такого трансформатора увеличится более чем на 60 %.

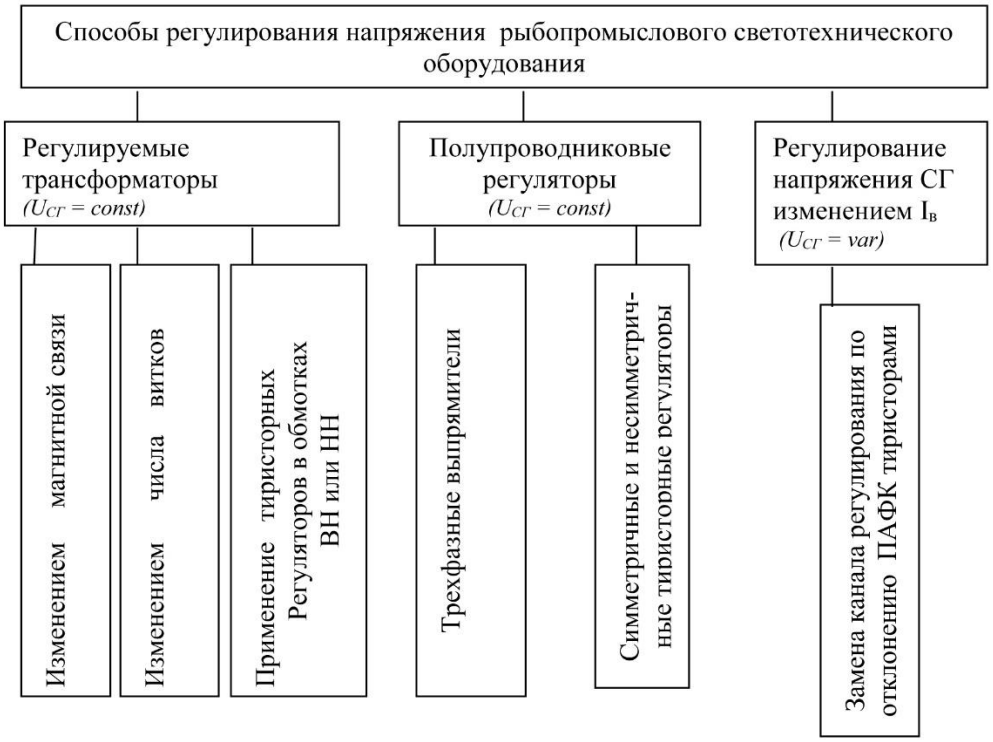

Рис. 1. Способы регулирования напряжения рыбопромыслового светотехнического оборудования. Составлено автором

Fig. 1. Voltage regulation methods for fishing lighting equipment. Compiled by the author

Наиболее приемлемым является трансформатор с регулированием нагрузки без отключения питания и обмоток (трансформаторы РПН). Они позволяют автоматически менять количество ответвлений и, соответственно, напряжение рыбопромысловых светильников в пределах $\pm(10-16)\%$. В современных устройствах эту регулировку можно осуществить токоограничивающим реактором, или резистором, или бесконтактным коммутатором с тиристорными ключами, что обеспечивает быстродействие, высокий коэффициент мощности и КПД, а главное, достаточный диапазон. При этом токи холостого хода остаются минимальные на уровне 6 % и не зависят от диапазона регулирования напряжения, а массогабаритные показатели не больше, чем у аналогичного обычного трансформатора такой же мощности.

Общий недостаток регулирования напряжения трансформаторами – масса трансформатора соизмерима с массой синхронного генератора, например, трансформатор ТСЗ-100/0,5 мощностью 100 кВТ имеет массу примерно 1 т, как и силовой генератор отечественного исполнения типа МСКФ-92-4.

Наиболее приемлемым является способ переключения секций вторичной обмотки трансформатора с помощью тиристорных ключей, причем следует использовать нереверсивные

секции, так как это позволяет уменьшить сложность коммутационного узла, зависящего от количества ключей. Это позволяет осуществить глубокое регулирование напряжения и не повлияет на массу трансформатора.

Хорошие результаты также можно получить с помощью тиристорных регуляторов, включенных в обмотки трансформатора, преимущественно во вторичную, так как это уменьшает количество встречно-параллельно включенных тиристоров и позволяет регулировать напряжение нагрузки от нуля до номинального.

Особенность тиристорных ключей в том, что в момент регулирования нагрузка отключена от трансформатора, но время срабатывания (переключения) очень мало, что вполне допустимо в отдельных случаях.

Питание и регулирование рыбопромыслового светотехнического оборудования от отдельного генератора целесообразно только в случае, когда мощность нагрузки соизмерима с мощностью генератора и нагрузка подключается под линейное напряжение генератора 230 В по схеме «треугольник», так как в этом случае обеспечивается полная загрузка генератора по мощности, т.е. отдельный генератор работает на это оборудование.

В данном случае изменение напряжения на выходе генератора осуществляется воздействием на его систему возбуждения через ток возбуждения. Отечественные генераторы типа МСК снабжены ПАФК (системы прямого амплитудно-фазового компаундирования), но имеется ограничение по диапазону регулирования в размере ±10 % от номинального напряжения. Чтобы расширить диапазон, надо вносить изменения в систему возбуждения СГ, а именно менять канал регулирования по отклонению, например, на тиристоры, шунтирующие входные или выходные цепи выпрямителя трехфазного ТФК (трансформатора фазового компаундирования), который через этот выпрямитель подает питание к обмотке возбуждения СГ. В этом случае блок питания корректора напряжения должен подключаться к независимому источнику с напряжением, но обмотки управления и рабочие обмотки вместе с блоком корректора напряжений становятся сильно перегруженными.

При рассмотрении процесса управления напряжением судовой трехфазной нагрузки с помощью управляемых и с помощью полууправляемых выпрямителей следует рассмотреть их диаграммы напряжений, построенные на основании зависимости действующего значения напряжения нагрузки $U_{нг}$ от угла управления тиристорами [2, 3].

На рис. 2 показаны регулировочные характеристики мостового управляемого выпрямителя в сравнении с симметричным регулятором напряжения в трёхфазной трёхпроводной системе электроснабжения.

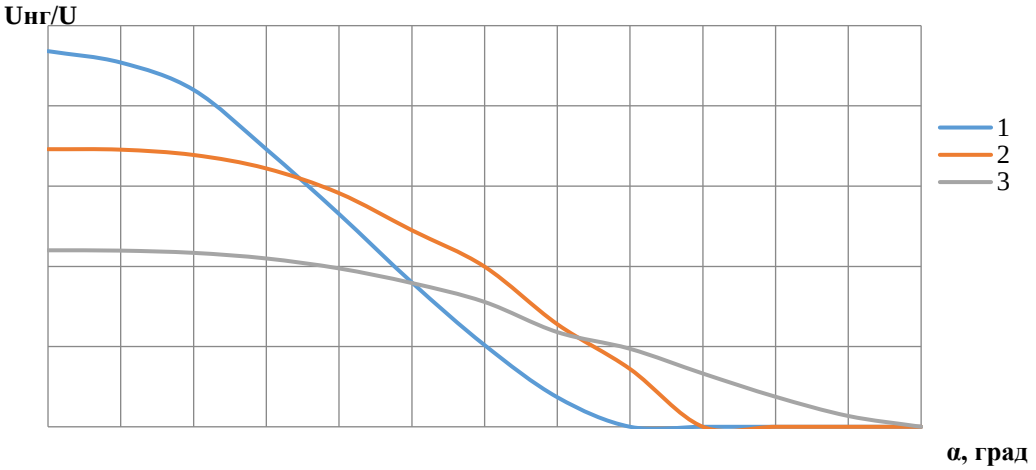

Рис. 2. Регулировочные характеристики: 1 – мостового управляемого выпрямителя; 2 – симметричного тиристорного регулятора с нагрузкой по схеме «треугольник»; 3 – тиристорного регулятора, включенного в фазы нагрузки, соединённой по схеме «звезда». Составлено автором

Fig. 2. Control characteristics: 1 – bridge controlled rectifier; 2 – symmetrical thyristor regulator with a delta-connected load; 3 – thyristor regulator connected to the phases of a star-connected load. Compiled by the author

Характеристика 1 на рис. 2 показывает действующее значение напряжения выпрямителя в режиме разрывного тока. Номинальному напряжению нагрузки соответствует угол регулирования α=0º, при изменении угла в пределах от 65º до 90º напряжение нагрузки уменьшается в 3 раза.

Исследования показали, то работа синхронного генератора с повышенным коэффициентом мощности и полноценная загрузки его приводного двигателя совместно с выпрямителями неприемлема, так как загрузка генератора и приводного двигателя оказывается примерно в 2 раза хуже, чем при питании нагрузки по схеме «треугольник» от отдельно выделенного генератора. Это потребует введения между источником и преобразователем понижающего трансформатора, что увеличит массу и стоимость электрооборудования в целом.

Для этих целей целесообразно применять трехфазные тиристорные регуляторы напряжения, подключенные между выводами отдельно выделенного для этих целей синхронного валогенератора (чтобы не перегружать судовую электростанцию) и группами распределенных по трем фазам промысловых светильников.

В трехпроводной трехфазной судовой системе электроснабжения целесообразно рассмотреть симметричные регуляторы переменного напряжения, которые по сравнению с несимметричными обеспечивают широкодиапазонное регулирование напряжения и минимальные потери мощности в источнике. Регуляторы могут выполняться по разным схемам, наилучшие из которых, это включение блока встречно-параллельных тиристоров последовательно в каждую фазу нагрузки, соединенной по схеме «треугольник» (диапазон регулирования показан на рис. 2, кривая 2) или «звезда» [4]. В первом случае несимметрия сопротивлений нагрузки вызывает несимметрию напряжений на фазах, что может быть причиной неконтролируемого перегорания люстр при повышении напряжения до недопустимых пределов. Наибольший диапазон изменения напряжения в нужных пределах от номинального значения дает регулятор, соединенный по схеме «звезда» (регулировочные характеристики показаны на рис. 2, кривая 3).

Для протекания тока нагрузки в трехфазных тиристорных регуляторах необходимо открытое состояние тиристоров в 2 или 3 фазах одновременно. Анализ работы регулятора при подаче СИФУ по 2 импульса за полпериода позволяет определить характерные зоны регулирования угла α: 1 – режим естественной коммутации, когда ток проводят все три тиристора ($U_{НГ}=max$ при α=0º); 2 – дограничный режим с двухфазной проводимостью: тиристоры проводят ток в двух фазах, при включении следующего один закрывается; 3 – сверхграничный режим с двухфазной проводимостью ($U_{НГ}=0$ при α=150º).

Временные диаграммы, приведенные на рис. 3 [5], позволяют определить пределы интегрирования и получить формулы действующего значения выходного напряжения (нагрузки) в разных диапазонах, определяющие регулировочные характеристики:

$$U_{нг} = \sqrt{3}U\sqrt{1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3\sin 2\alpha}{4\pi}}; \quad 0 \le \alpha \le \frac{\pi}{3}, \tag{1}$$

$$U_{нг} = \sqrt{3}U\sqrt{0{,}5 + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\sin(2\alpha + \pi/6)}; \quad \frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{\pi}{2}, \tag{2}$$

$$U_{нг} = \sqrt{3}U\sqrt{0{,}416 - \frac{2}{2\pi} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi}\cos 2\alpha + \frac{1}{8\pi}\sin 2\alpha}, \quad \frac{\pi}{3} \le \alpha \le \frac{\pi}{2}, \tag{3}$$

где U – действующее фазное напряжение синхронного генератора.

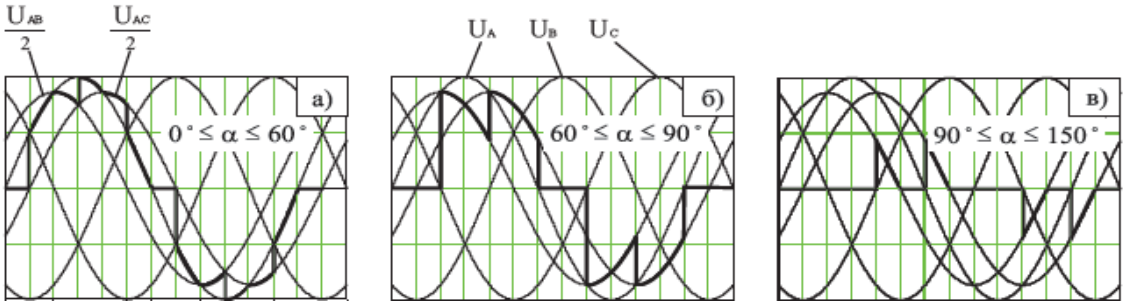

Рис. 3. Временные диаграммы напряжений СГ при симметричной нагрузке, соединенной схемой «звезда» при углах управления: а) α=30º; б) α=60 º; в) α=120º [5, с. 28]
Fig. 3. Timing diagrams of the SG voltages with a symmetrical star-connected load at control angles: a) α=30º; b) α=60; c) α=120º [5, p. 28]

Для исследования физических процессов и динамических режимов рассматриваемой системы электроснабжения «синхронный генератор – тиристорный регулятор – трехфазная нагрузка» удобно применять математическую модель в программном комплексе Matlab (пакеты программ Simulink, SimPowerSystems и др.), по которой можно исследовать работу регулятора на активную и реактивную нагрузку в симметричных и несимметричных режимах. Пример обобщенной модели для исследования переходных процессов тиристорного регулятора при работе на активную нагрузку приведен на рис. 4 [5].

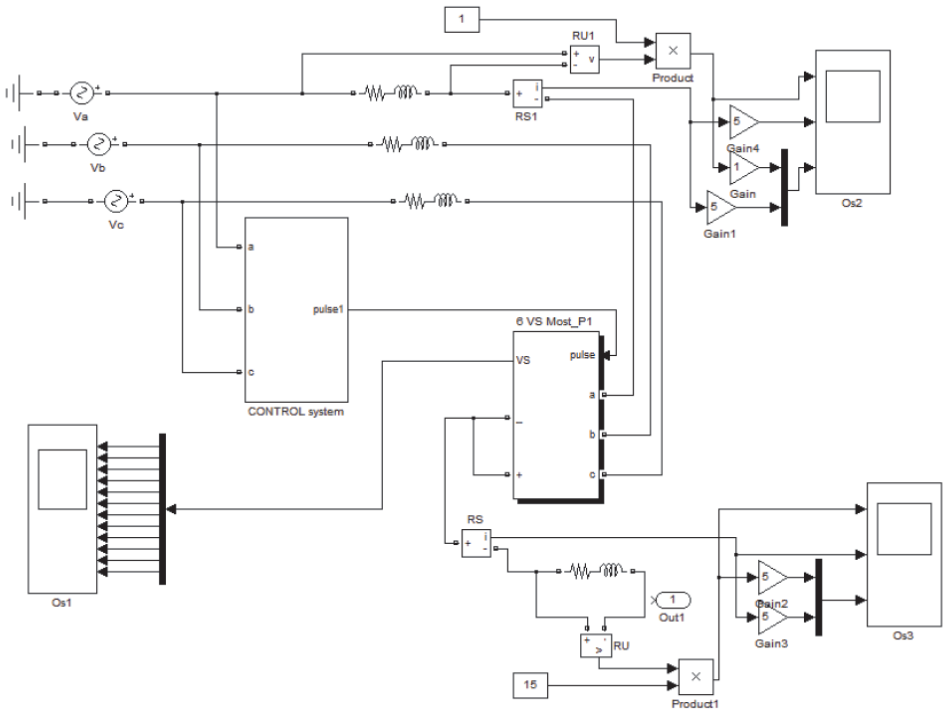

Рис. 4. Модель трехфазного регулятора в программном комплексе Matlab [5, с. 102]
Fig. 4. Model of a three-phase regulator in the Matlab software package [5, p. 102]

Для рыбопромыслового оборудования особенно важно рассмотреть несимметричные режимы в трехфазной системе электроснабжения, необходимые для игры света светотехнического оборудования, распределенного по отдельным фазам и управляемого светового потока в них.

Напряжения нагрузки в фазах пропорционально сопротивлению в них, т.е. количеству включенных люстр. Значительный перекос напряжений возникает в случае обрыва одной из

фаз (отключение люстр). Меняя параметры сопротивлений по фазам, можно смоделировать необходимую «игру света», создаваемую разными значениями напряжений, подаваемых на люстры.

Исследования показали, что максимальная несимметрия имеет место при обрыве одной фазы нагрузки и угле управления тиристорами 90º – фазные напряжения более чем в 1,5 раза, что недопустимо даже кратковременно.

Для регулятора, соединенного по схеме «звезда» при соотношении нагрузок в фазах $R_a=2R_в=2R_c$, и при α=0 напряжение фазы *а* в 1,2 раза превосходит действующее фазное напряжение СГ, а в двух других фазах оно уменьшается. При $\alpha \geq 60^o$ действующее значение первой фазы в 1,3 раза больше других по сравнению с симметричным режимом. При обрыве фазы напряжение в ней при α=0 на 50 % больше фазного напряжения генератора (230 В), при этом напряжения в других фазах нагрузки равны 110 В, а при больших углах они отличаются в $\sqrt{3}$ раза.

Это вызывает необходимость контроля перенапряжений во всех фазах нагрузки, т.е. снимать управляющие импульсы с тиристоров.

Названное обстоятельство и большие перепады фазных напряжений делают способ регулирования напряжения тиристорными регуляторами в трехфазной системе неудобным и обуславливают применение четырехпроводной системы электроснабжения. Такая схема обеспечивает широкий диапазон регулирования напряжения рыбопромысловых источников света от $1{,}1U_н$ при угле управления от нуля до 180º, при этом падение напряжения в нейтральном проводе будет незначительное из-за низкого значения его полного сопротивления [2, 3].

При использовании выпрямителя с нулевым проводом диапазон регулирования напряжения $U_{нг} \leq 1{,}1U$ приходится на режим прерывистого тока. И хотя наибольшее напряжение, при $\alpha=0$, не превышает $1{,}2U_{ном.}$, генератор и приводной двигатель оказываются недоиспользованы по мощности в 1,6 раза и в 1,2 раза соответственно. К тому же ток нагрузки в этом случае протекает по нулевому проводу и составляет $1.73\ I_{фаз.ном.}$. Это потребует внесения изменений в систему судовой электростанции, а именно: замену внутреннего нулевого провода, в противном случае синхронный генератор будет более чем в 9 раз недогружен по мощности, так как Правилами Морского регистра нулевой провод ограничен значением 30 % от фазного номинального тока.

Рассмотренный случай максимальной несимметрии напряжений при отключении групп светильников в одной фазе показал необходимость ограничивать ток в нейтральном проводе, соединяющем нейтральные точки генератора и нагрузки, который при обрыве фазы становится равным номинальному фазному. Поэтому, чтобы поддерживать этот ток на уровне 1/3 номинального фазного, необходимо исключить такой случай и соблюдать порядок включения светотехнического оборудования таким образом, чтобы числа включенных в разные фазы люстр не отличались больше, чем на единицу.

Гармонический анализ токов путем моделирования в программном комплексе Matlab (пакеты программ Simulink, SimPowerSystems и др.) через функциональный блок Powergui функции FFT Analysis Tool показал, что ток нулевого провода генератора больше токов отдельных гармоник и однозначно требует коррекции, т.е. уменьшения до значения не более одной трети от номинального фазного. Применение заграждающих активных фильтров, включенных последовательно в провод, позволит увеличить сопротивление нейтрального провода и, следовательно, уменьшить ток в нем. Оптимальный фильтр должен соответствовать двум критериям: минимальной суммарной установленной мощности каждого его элемента и значительному ограничению тока нулевого провода.

В связи с нелинейным характером светодиодных источников рыбопромыслового оборудования необходимо также учитывать их электромагнитную совместимость с общей судовой сетью.

Таким образом, приведенные исследования показали, что наиболее оптимальным по энергетическим, массогабаритным и другим показателям является применение тиристорного

регулятора напряжения в трех- или четырехпроводной трёхфазной системе, который обеспечит широкодиапазонное управление световым потоком на сайровом промысле. При этом обязателен контроль работы СИФУ с целью ограничения возможного перенапряжения в фазах при крайнем случае несимметрии.

Заключение

Проведённый сравнительный анализ способов управления световым потоком на сейнере-траулере показал целесообразность изменения напряжения светотехнических промысловых светильников с помощью полупроводниковых регуляторов без вмешательства в оборудование судовой электростанции, с высоким коэффициентом использования синхронного генератора по мощности и минимальными энергетическими потерями.

Для изучения работы устройств по регулированию напряжения светотехнического оборудования, которые подключены к источнику с неизменным номинальным напряжением, необходимо проанализировать временные диаграммы напряжений на нагрузке в характерных диапазонах угла управления тиристорами, получить формулы и построить регулировочные характеристики, необходимые для настройки элементов системы.

С помощью компьютерного моделирования удобно исследовать симметричные и несимметричные режимы работы промысловых источников света при регулировании подводимого к ним напряжения путём изменения количества и мощности люстр в фазах.

Список источников

1. Мизюркин, М. А. Результативность промысла сайры судами, оснащенными различными источниками света / Мизюркин М. А., Жук А. П., Кручинин О. Н., Еремин Ю. В., Буслов А. В. и др. // Рыбное хозяйство. 2019. №1. С. 30–34.

2. Матафонова Е. П., Бурханов С. Б. Особенности применения тиристорных регуляторов для управления световым потоком в промышленном рыболовстве (научная статья) // E3S Web of Conferences 320, 01015 (2021) / Application Features of Thyristor Regulators to Control the Light Flux in Industrial Fishing (англ.) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132001015.

3. Матафонова Е. П., Бурханов С. Б. Управление световым потоком рыбопоискового светотехнического оборудования крупнотоннажного траулера // Вестник АГТУ. Серия : Рыбное хозяйство. 2025. № 3. С. 125–132.

4. Ganthia B. P., Ray L., Senapati P., Barik S. K. Simulation of Three Phase Voltage Controlled Soft Switching Start of Induction Motor Drive. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). Volume 8. Issue 3, September 2019, pp.8104–8105. ISSN: 2277-3878. Available from: https://www.ijrte.org/wpcontent/uploads/papers/ v8i3C6441098319.pdf [Accessed 19/02/26].

5. Климаш В. С. Регулировочные свойства, энергетические показатели и моделирование в среде Matlab выпрямителей и регуляторов переменного напряжения : учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. 114 с.

Информация об авторе

Е. П. Матафонова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматика».

Information about the author

E. P. Matafonova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Automation.

Статья поступила в редакцию 20.02.2026; одобрена после рецензирования 07.04.2026; принята к публикации 11.05.2026.

The article was submitted 20.02.2026; approved after reviewing 07.04.2026; accepted for publication 11.05.2026.

© Матафонова Е. П., 2026.

«Исследование способов управления световым потоком путем регулирования напряжения на рыбопромысловых светильниках» [Матафонова Е. П.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).