
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.315.14:621.315.175

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ
ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ В
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

© 2021 Е.С. Молошная, В.В. Нечитайлов, И.В. Мельников, С.А. Баран

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Ростовская атомная станция является крупнейшим энергетическим центром на Юге России. Электроэнергия от АЭС передается на узловые подстанции по территории Южного региона, климатические условия которого способствуют образованию гололедных отложений на линиях электропередач это обуславливает актуальность проблемы плавки гололеда. Существующие системы раннего обнаружения гололеда и плавки его на проводах ВЛ 110-500 кВ позволяют предотвратить обрыв проводов и разрушение опор. В современных методах плавка гололеда выполняется переменным и постоянным током с использованием специальных трансформаторов и выпрямителей с напряжением плавки 10 кВ и током плавки до 3600 А. В технологических картах плавки гололеда установлены требования к контролю величины токов плавки на стороне переменного и постоянного тока в зависимости от метеоусловий, токов и напряжений для предотвращения перегрева контактов в схемах плавки и соблюдения параметров плавки. В схемах с использованием постоянного тока нет надежной методики контроля его величины. В работе рассматривается возможность применения волоконно-оптического датчика тока с диапазоном измерения от 1 до 3600 А.

Ключевые слова: плавка гололёда, контроль тока плавки и напряжения, волоконно-оптический датчик, понижающий трансформатор, трёхфазный мостовой выпрямитель, система управления, регулирования, защиты и автоматики, индукция магнитного поля, эффект Фарадея, оптоэлектронный трансивер, поляризатор.

Поступила в редакцию 16.04.2021

После доработки 28.04.2021

Принята к публикации 30.04.2021

В условиях Южного региона для плавки гололеда на высоковольтных воздушных линиях используются источники питания, как переменным, так и постоянным током. Для линий электропередач 220, 500кВ в «длинную» сторону целесообразно использование источников постоянного тока, так как при этом исключается влияние на процесс плавки гололеда, индуктивного сопротивления линии и соответственно потребует меньшей полной мощности. Источник питания для плавки гололеда (далее ПГ) представляет собой трехфазный понижающий трансформатор (рис. 1), с подключением к трехфазным мостовым выпрямителям. Наиболее удобным выходным напряжением является напряжение 10 кВ. Мощность плавки гололеда должна соответствовать интенсивности гололедообразования на проводах и длины линии ЛЭП, поэтому выпрямительные установки могут включаться последовательно, за счет чего увеличивается в 2 раза напряжение плавки гололеда.

Для плавки гололеда ЛЭП 500кВ широко применяются выпрямители трехфазные постоянного тока с принудительным воздушным охлаждением, диодные (далее В-ТППД). Ток плавки гололеда определяется величиной выбранного напряжения агрегата и коэффициентом трансформации разделительного трансформатора питающей

выпрямительной установки. Для выпрямительной установки применена трехфазная мостовая схема, преобразовывающая трехфазный ток с частотой 50 Гц в постоянный при минимальном коэффициенте пульсации. Конструктивно силовая часть выпрямителя размещена в трех шкафах в каждом из которых размещаются два диодных высоковольтных плеча одной фазы.

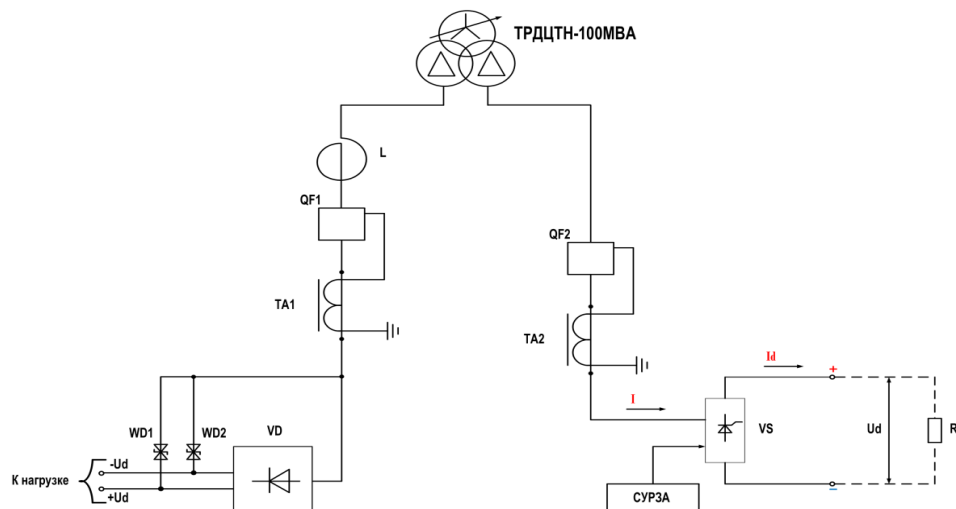


Рисунок 1 – Однолинейная схема устройств плавки гололеда, выполнена на диодах и тиристорах, где ТРДЦТН-трансформатор плавки гололеда, QF-вакуумный выключатель, L-реактор, ТА-трансформатор тока, VD-шкаф диодный, WD-ограничители перенапряжений, VS-выпрямительная установка плавки гололеда, СУРЗА-система регулирования, релейная защита и автоматика [A single-line diagram of ice melting devices, made on diodes and thyristors, where ТРДЦТН is an ice melting transformer, a QF-vacuum circuit breaker, an L-reactor, a TA-current transformer, a VD-diode cabinet, WD-surge arresters, a VS-ice melting rectifier, SURZA-control system, relay protection and automation]

Датчиками тока для вторичных цепей управления и защиты служат трансформаторы тока, соединенные в звезду с нулевым выводом, установленные на входе выпрямителя. В силовой части выпрямительной установки со стороны трехфазной сети установлены токоограничивающие реакторы. В схемах плавки гололеда постоянным током могут присутствовать высшие гармоники, оказывающие негативное влияние на оптический грозотрос, предназначенный для передачи сигналов высокой частоты, находящиеся в магнитном поле обогреваемой линии, что приводит к возникновению помех. Это обуславливает необходимость дополнительной защиты этих линий на кратковременный период плавки гололеда. Управление выпрямителем осуществляется блоком системы регулирования защиты и автоматики (далее СУРЗА). Выпрямительная установка является источником питания для цепи плавки гололеда, в которую включены провода или тросы ВЛ, соединенные по одной из схем, обеспечивающих образование контура постоянного тока (провод-два провода, провод-провод). Управление производится с помощью органов управления СУРЗА, измерение постоянного тока до 2 кА в цепи плавки гололеда может производиться с использованием датчиков типа LEM [1], принцип работы которых основан на использовании эффекта Холла [2] (рис. 2), силовым воздействием магнитного поля создаваемым измеряемым током на заряды во вторичной цепи, которые расположены перпендикулярно силовым линиям. Измеренный постоянный ток течет по проводнику вокруг которого образуется постоянное магнитное поле. Датчик Холла [3] представляет собой пластину из полупроводникового или проводникового материала. На заряды в пластине со стороны магнитного поля действует сила Лоренца и они смещаются к противоположным сторонам пластины создавая, таким образом, разность потенциалов пропорциональную силе измеряемого тока.

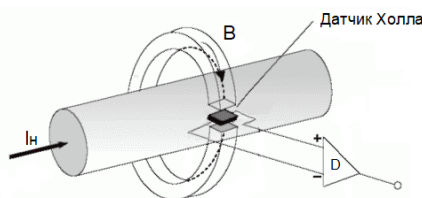


Рисунок 2 – Датчик Холла: I_n – ток нагрузки, B – незамкнутое магнитное кольцо, D – усилитель сигнала
[Hall sensor: I_n is the load current, B is an open magnetic ring, D is a signal amplifier]

При всей неприхотливости в обслуживании главным недостатком таких датчиков является высокая погрешность измерений, так как на его работу оказывает влияние магнитное поле, создаваемое в электроустановке. Величина помех может создавать значительные неточности измерения тока, в то время как в реальных условиях существует необходимость измерения выходного тока в зависимости от интенсивности гололёдообразования, что делает мало приемлемым применение этих датчиков.

В существующих схемах измерение тока производится через измерительные трансформаторы тока, которые установлены на входе в цепь выпрямителя, а значения постоянного тока на выходе выпрямителя не измеряются. Это усложняет процесс контроля управления и защиты плавки гололеда. Решить проблему измерения выпрямленного тока можно применив оптический датчик тока, принцип которого основан на эффекте Фарадея [4], по которому у светового потока, проходящего через магнитное поле изменяется поляризация.

Согласно закону Верде вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного монохроматического света, проходящего в изотропной среде вдоль магнитного поля, угол поворота плоскости поляризации определяется напряженностью магнитного поля (H) и длиной пути светового луча (l) вдоль силовой линии магнитного поля [5], формула (1):

$$\Theta = V \times l \times H, \quad (1)$$

где Θ – угол поворота светового луча;

V – постоянная Верде, определяемая длиной волны светового луча, свойствами среды и температурой.

Постоянная Верде – величина, характеризующая магнитное вращение плоскости поляризации в веществе. Ее значение зависит от свойств вещества и длины волны, монохроматического излучения. При $V > 0$, в данной среде происходит правостороннее вращение луча. Направление угла поворота плоскости поляризации зависит только от направления магнитного поля, но не от направления светового луча вдоль поля или против него. Закон Верде, описывающий эффект Фарадея используется для бесконтактного измерения в цепи плавки гололеда. Магнитное поле существует вокруг воздушных линий постоянного тока. Линейно поляризованный луч, находящийся в чувствительном элементе отклонен на некоторый угол. Угол поворота плоскости поляризации определяется величиной напряженности магнитного поля, которое пропорционально намагничивающему току [6].

Оптоэлектронный трансивер (рис. 3) преобразует излучение светодиода в два линейно поляризованных оптических сигнала [7], которые вводятся и распространяются в оптическом волокне, сохраняющем поляризацию до кольцевой намотки волокна (чувствительного элемента). Назначение поляризатора разделить два линейно поляризованных сигнала на сигнал с правой и левой круговой поляризацией. Поляризованный оптический сигнал проходит по кольцевой намотке волокна по проводнику с током несколько раз [8]. В силу эффекта Фарадея, состоящего в зависимости величины преломленного луча оптического материала от величины

магнитного поля, создаваемого электрическим током, скорость распространения оптического сигнала с левой поляризацией уменьшается, а с правой поляризацией – увеличивается. После прохождения полного пути по кольцевой намотке волокна, оптические сигналы с круговой поляризацией проходят через светоделитель, движутся обратно, удваивая при этом эффект фазового рассогласования двух кругополяризованных сигналов. Сигнал, поступив на вход поляризатора, преобразуется обратно в линейно поляризованные оптические сигналы, который поступает на оптоэлектронный трансивер. Разность в скорости распространения преобразуется в фазовый сдвиг двух сигналов. Поскольку оптические сигналы распространяются по одинаковому пути с одинаковым влиянием на них вибрации и температуры, то точность измерения величины тока не зависит от действия этих факторов. Волоконно-оптический датчик [9] тока имеет высокую точность: Кл. 0,2 для токов от 1 до 3600 А. Аналого-цифровой преобразователь усиливает полученные электрические сигналы и обеспечивает действие цифровой системы защиты и измерения [10].

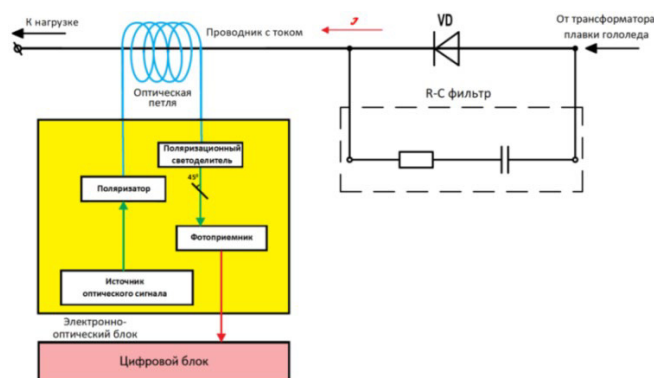


Рисунок 3 – Схема выпрямительной установки с волоконно-оптическим датчиком тока, где VD-диодный шкаф, R-C-фильтр для сглаживания пульсаций [Diagram of a rectifier unit with a fiber-optic current sensor, where VD is a diode cabinet, an R-C filter for smoothing ripple]

Для тестирования образца датчика были произведены измерения постоянного тока $I=500$ А, полученного на выходе выпрямительной установки на РП 220кВ Волгодонск. В качестве источника светового потока используется неоновый лазер 1 с длиной волны $\lambda=630$ нм [11] (рис. 4), этот луч попадает в патч корд 2, на конце которого расположен коллиматор 3, дающий практически параллельные пучки, которые попадают на поляризатор 4, пропускающий только одну форму. Далее свет проходит по проводнику с током 6, таким образом, обмотка оптоволокна находится в постоянном магнитном поле. Далее световой луч проходит через анализатор 7, связанный со шкалой углов, через коллиматор 8 и регистрируется фотоприемником 9.

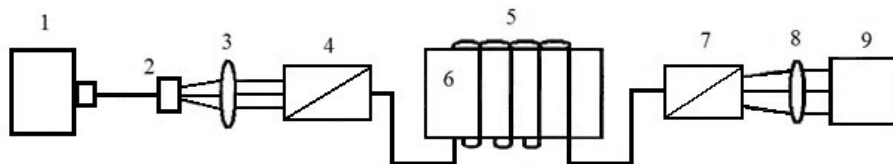


Рисунок 4 – Схема установки ВОДТ: 1 – неоновый лазер, 2 – патч корд, 3 – коллиматор, 4 – поляризатор, 5 – волоконно-оптическая петля, 6 – проводник с током, 7 – анализатор, 8 – коллиматор, 9 – фотоприемник [Fiber optical current sensor setup scheme: 1 – neon laser, 2 – patch cord, 3 – collimator, 4 – polarizer, 5 – fiber-optic loop, 6 – current-carrying conductor, 7 – analyzer, 8 – collimator, 9 – photodetector]

Постоянная Верде может быть определена с использованием двух режимов работы установки: 1 – без тока, 2 – с пропущенным измеряемым током. Интенсивность

света, проходящего через оба поляризатора зависит от угла Θ (угол между осями пропускания поляризаторов друг относительно друга для первого режима):

$$Int = \frac{1}{2} Int_0 \cos^2 \Theta$$

При втором режиме магнитным полем создается перемещение поляризованного излучения относительно первого на угол $\Delta\Theta$ (для второго режима):

$$Int = \frac{1}{2} Int_0 \cos^2(\Theta + \Delta\Theta)$$

Были проведены соответствующие измерения света в зависимости от угла между осями поляризаторов в двух режимах, по результатам опыта построенные в зависимости функции вида $Int = const \cdot \cos^2(\Theta + k_1)$ (для режима 1) и $Int = const \cdot \cos^2(\Theta + k_2)$ (для режима 2).

Сдвиг фаз между кривыми, построенными по результату опытов, соответствуют углу Θ , на которые повернулась плоскость поляризации в процессе воздействия магнитного поля.

Постоянную Верде можно определить по формуле (2):

$$V = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l}, \quad (2)$$

где I – ток в катушке;

N – количество витков в катушке;

l – размер обмотки.

При проведении опытов был использован $I=500$ А на выходе выпрямительной установке. Определена магнитная индукция поля постоянного тока и вычислена напряженность электрического поля:

$$H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{500 \cdot 400}{0.08} \approx 0,314 [\text{Эр}].$$

На основании опыта и расчета получены точки, соответствующие величине плоскости поворота поляризации [12]. Аппроксимирующие кривые показаны на рисунке 5.

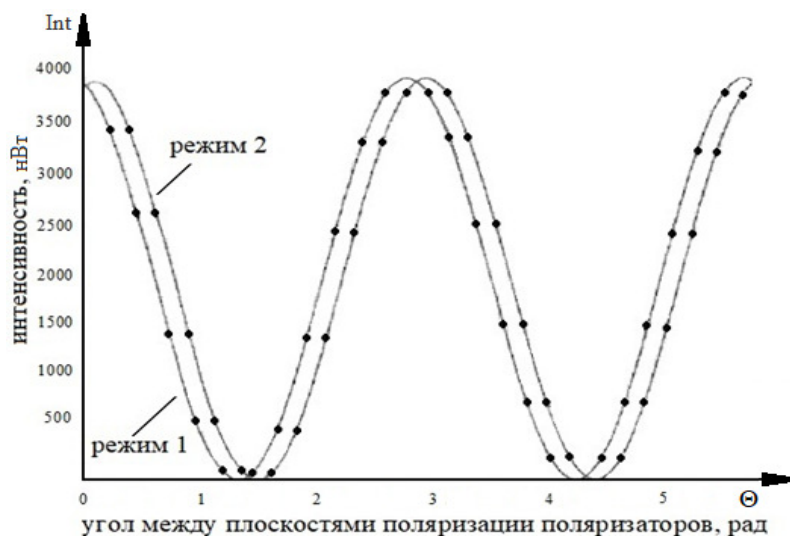


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности света от угла поляризации [Light intensity versus polarization angle]

Таким образом, как видно из графика, $\Theta = 0,18$ рад = $10,313^0$. Тогда постоянная Верде находится следующим образом:

$$V = \frac{\Theta \cdot 60}{n \cdot l} = \frac{10,313 \cdot 60}{900 \cdot 8} = 0,085 \frac{\text{мин}}{\text{Э} \cdot \text{см}}$$

Полученное значение постоянной Верде соответствуют магнитоактивному стеклу, это значит волоконно-оптический датчик тока может быть применен для измерения токов для установок плавки гололеда постоянным током. Достоинства этого метода является высокий класс точности 0,2 и большой диапазон измеряемых токов — до 3,6 кА, высокое быстродействие и независимость от воздействия внешних факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чечерников, В.И. Магнитные измерения / Н.И. Чечерников. — Москва: Издательство Московского университета, 1969. — С. 320-327.
2. Абраменкова, И. Оптические датчики тока и напряжения / И. Абраменкова, И. Корнеев, Ю. Троицкий // Компоненты и технологии. — 2010. — № 8. — С. 60-63.
3. Гавричев, В.Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля / В.Д. Гавричев, А.Л. Дмитриев. — Санкт-Петербург : СПбНИУ ИТМО, 2013. — 83 с.
4. Некрашевич, Е. Волоконно-оптические датчики тока / Е. Некрашевич, Н. Старостин // Электронные компоненты. — 2006. — № 11. — С. 23-77.
5. Гуляев, Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // Фотон-экспресс : Спецвыпуск. — 2005. — № 6. — С. 114-127.
6. Рембеза, С.И. Физика твердого тела. Оптические, диэлектрические и магнитные свойства твердых тел. Ч. III / С.И. Рембеза, Н.И. Каргин. — Ставрополь : СевКавГТУ, 2003.
7. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. — Москва : Техносфера, 2008. — 520 с.
8. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
9. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети / Ю.Н. Кульчин. — Москва : Физматлит, 2001. — 272 с.
10. Соколов, А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы / А. Соколов, В. Яцеев // Световая волна. Русское издание. — 2006. — № 4. — С. 44-46.
11. Калитиевский, Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитиевский. — Санкт-Петербург : Лань, 2006. — 480 с.
12. Волкова, Е.А. Поляризационные измерения / Е.А. Волкова. — Москва : Наука, 1974. — 224 с.

REFERENCES

- [1] Chechernikov V.I. Magnitnyye izmereniya [Magnetic Measurements]. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta [Moscow: Moscow University Press]. 1969. P. 320-327 (in Russia).
- [2] Abramenkova I., Korneev I., Troitskiy Yu. Opticheskiye datchiki toka i napryazheniya [Optical sensors for current and voltage]. Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]. N 8. P. 60-63 (in Russia).
- [3] Gavrichev V.D., Dmitriev A.L. Volokonno-opticheskiye datchiki magnitnogo polya [Fiber-optic magnetic field sensors]. Tutorial. Sankt-Peterburg: SPbNIU ITMO [St. Petersburg: SPbNIU ITMO]. 2013. 83 p. (in Russia).
- [4] Nekrashevich E., Starostin N. Volokonno-opticheskiye datchiki toka [Fiber Optic Current Sensors]. Elektronnyye komponenty [Electronic Components]. 2006. № 11. P. 23-77 (in Russia).
- [5] Gulyaev Yu.V., Nikitov S.A., Potapov V.T., Chamorovsky Yu.K. Volokonno-opticheskiye tekhnologii, ustroystva, datchiki i sistemy [Fiber-Optic Technologies, Devices, Sensors and Systems]. Foton-ekspress: Spetsvypusk [Photon Express: Special]. 2005. № 6. P. 114-127 (in Russia).
- [6] Rembez S.I., Kargin N.I. Fizika tverdogo tela. Opticheskiye, dielektricheskiye i magnitnyye svoystva tverdykh tel. Ch. III [Solid State Physics. Optical, Dielectric and Magnetic Properties of Solids. P. III]. Stavropol: SevKavGTU [Stavropol: Publishing House SevKavGTU]. 2003 (in Russia).

- [7] Udd E. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber Optic Sensors]. Moskva: Tekhnosfera [Moscow: Technosphere]. 2008. 520 p. (in Russia).
- [8] Okoshi T. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber Optic Sensors]. Leningrad: Energoatomizdat. 1990. 256 p. (in Russia).
- [9] Kulchin Yu.N. Rasprelenyie volokonno-opticheskie datchiki i izmeritel'nye seti [Distributed Fiber Sensors and Measuring Networks]. Moskva: Fizmatlit [Moscow: Fizmatlit]. 2001. 272 p. (in Russia).
- [10] Sokolov A., Yatshev V. Volokonno-opticheskie datchiki i sistemy: principy postroeniya, vozmozhnosti i perspektivy [Fiber-Optic Sensors and Systems: Principles of Construction, Possible Costs and Prospects]. Svetovaya volna. Russkoye izdaniye [Lightwave. Russian Edition]. 2006. № 4. P. 44-46 (in Russia).
- [11] Kalitievsky N. I. Volnovaya optika [Wave Optics]. Saint Petersburg. Lan' Publisher, 2006. 480 p.
- [12] Volkova E.A. Polyarizacionnye izmereniya [Polarization Measurements]. Moskva: Nauka [Moscow: Nauka]. 1974. 224 p. (in Russia).

Analysis of the Possibility of Ice Melting Intensity Monitoring by Direct Current in High-Voltage Electrical Systems

E.S. Moloshnaya¹, V.V. Nechitailov², I.V. Melnikov³, S.A. Baran⁴

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0001-8766-2290

WoS Researcher ID: AAH-5369-2020

e-mail: elena_moloshnay@mail.ru

²e-mail: VVNechitailov@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0002-8613-9083

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-3232-4072

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

Abstract – The Rostov nuclear power plant is the largest energy center in the South of Russia. Electricity from the nuclear power plant is transmitted to nodal substations across the territory of the Southern region, the climatic conditions of which contribute to the formation of ice deposits on power lines, this determines the urgency of the problem of ice melting. Existing systems for early detection of ice and melting it on wires of 110-500 kV overhead lines allow preventing wire breakage and destruction of supports. In modern methods ice melting is performed with alternating and direct current using special transformers and rectifiers with a melting voltage of 10 kV and a melting current of up to 3600 A, currents and voltages to prevent overheating of contacts in melting circuits and compliance with melting parameters. In circuits using direct current, there is no reliable method for controlling its magnitude. The paper considers the possibility of using a fiber-optic current sensor with a measurement range from 1 to 3600 A.

Ключевые слова: ice melting, melting current and voltage control, fiber-optic sensor, step-down transformer, three-phase bridge rectifier, control, regulation, protection and automation system, magnetic field induction, Faraday effect, optoelectronic transceiver, polarizer.