

**БАЗА ДАННЫХ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ
В МАГИСТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ «СЕВЕРНЫЙ ТРАНЗИТ»**
**DATABASE OF GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS
IN THE MAIN TRANSMISSION LINE “NORTHERN TRANSIT”**

В.Н. Селиванов *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru***V.N. Selivanov***Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia,
v.selivanov@ksc.ru***Т.В. Аксенович** *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, t.aksenovich@ksc.ru***T.V. Aksenovich***Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia,
t.aksenovich@ksc.ru***В.А. Билин** *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, v.bilin@ksc.ru
Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия***V.A. Bilin***Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia,
v.bilin@ksc.ru
Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia***В.В. Колобов** *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, v.kolobov@ksc.ru***V.V. Kolobov***Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia,
v.kolobov@ksc.ru***Я.А. Сахаров** *Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, sakharov@pgia.ru
Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия***Ya.A. Sakharov***Northern Energetics Research Centre KSC RAS,
Apatity, Russia, sakharov@pgia.ru
Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia*

Аннотация. Создана и размещена в открытом доступе база данных, содержащая результаты измерений геоиндуцированных токов (ГИТ) за период 2011–2022 гг. в нейтралах трансформаторов на трех электрических подстанциях 330 кВ магистральной электрической сети «Северный транзит», проходящей по территории Республики Карелия, Мурманской и Ленинградской областей. Значение ГИТ зависит от величины геоэлектрического поля на поверхности Земли, взаимного расположения подстанций, к которым подключены линии электропередачи, сопротивлений элементов электрической сети. Немаловажными факторами являются разветвленность электрической сети, которая определяет пути растекания индуцированных токов, и топология сети на момент записи данных мониторинга. Описаны структура и принципы функционирования единственной в России региональной системы мониторинга ГИТ в электрической сети. Продемонстрированы особенности содержащихся в базе ГИТ данных, которые необходимо учитывать при их обработке и анализе. Приведены примеры использования базы данных ГИТ в энергетических и геофизических исследованиях. Выполненная работа по организации непрерывной регистрации ГИТ на подстанциях магистральной электрической сети в Арктической зоне не имеет аналогов в Российской Федерации и предоставляет обширный оригинальный

Abstract. Database containing the results of measurements of geomagnetically induced currents (GIC) for the period of 2011 to 2022 in transformer neutrals at three 330 kV substations of the main power transmission lines “Northern Transit” passing through the territory of the Republic of Karelia, Murmansk and Leningrad regions has been created and is publicly available. The GIC value depends on the geoelectric field magnitude in the Earth surface, on the relative position of the substations to which the power transmission lines are connected, and on the resistance of electrical network elements. Important factors are the electrical network branching, which determines paths of induced current spreading, and the network topology at the time of monitoring data acquisition. We describe the structure and principles of functioning of the Russian unique regional monitoring system of geomagnetically induced currents in the electrical network. We demonstrate the features of the data contained in the GIC database, which must be taken into account when processing and analyzing the data. Examples of using the GIC database for energy and geophysical studies are given. The work performed on the organization of continuous monitoring of GIC at substations of the main power transmission line in the Arctic zone has no analogues in the Russian Federation and provides extensive original material that allows us to study geomagnetic disturbances and their impact on electrical networks. The database is available at [<http://gic.en51.ru>].

материал, позволяющий исследовать геомагнитные возмущения и их влияние на электрические сети. База данных находится в открытом доступе [<http://gic.en51.ru>].

Ключевые слова: космическая погода, геоиндуцированные токи, линия электропередачи, трансформатор, база данных.

Keywords: space weather, geomagnetically induced currents, transmission lines, transformer, database.

ВВЕДЕНИЕ

Солнце является источником не только видимого света, но также электромагнитного и корпускулярного излучений других видов; эти излучения формируют космическую погоду Земли. Потоки ионизированных частиц (солнечный ветер), достигая Земли, взаимодействуют с ее магнитосферой и вызывают геомагнитные возмущения, в том числе магнитные бури и суббури [Акасофу, Чепмен, 1975; Coster et al., 2021]. Магнитосферные возмущения приводят к возникновению геоиндуцированных токов (ГИТ), протекающих по поверхности Земли и в замкнутых через землю протяженных проводниках — линиях электропередачи (ЛЭП) и связи, нефте- и газопроводах, железнодорожных рельсах [Пилипенко, 2021; Pulkkinen et al., 2017]. Величина ГИТ зависит от значения геоэлектрического поля на поверхности Земли и сопротивления образованной протяженным проводником замкнутой токовой цепи [Zheng et al., 2014]. В периоды экстремально сильных геомагнитных возмущений геоэлектрическое поле может достигать 15 В/км. В ЛЭП с характерной длиной 100 км и суммарным сопротивлением постоянному току проводов, обмоток трансформаторов и заземления терминальных подстанций ~5 Ом, ГИТ может достигнуть 300 А и выше [Карпенчан, 2005].

Для самих линий электропередачи ГИТ не представляют серьезной опасности. Амплитуды ГИТ на порядок меньше допустимых токовых нагрузок проводов воздушных линий, а длительность воздействия токов, способных вызвать ощутимый нагрев проводов, пренебрежимо мала. Влияние ГИТ на электрокоррозию металлоконструкций ЛЭП, вероятно, также незначительно. Наибольшую опасность ГИТ представляют для измерительных трансформаторов, а также силовых трансформаторов и автотрансформаторов с заземленной нейтралью, установленных на электрических подстанциях [Гершенгорн, 1993; Abda et al., 2020].

По отношению к промышленной частоте переменного тока (50 или 60 Гц) геоиндуцированные токи с характерной частотой от 0.001 до 0.1 Гц можно считать постоянными. Протекание постоянных токов в обмотках электрических машин (силовых и измерительных трансформаторов, реакторов и генераторов) приводит к появлению постоянных магнитных полей в их магнитопроводах. Подмагничивание сердечника постоянным полем вызывает его полупериодное насыщение, приводящее к дополнительному нагреву оборудования, искажению формы напряжений и токов в электрической сети и другим последствиям, которые могут стать причиной как ухудшения рабочих характеристик и снижения срока службы, так и внезапного отказа оборудования.

Во время интенсивных геомагнитных возмущений возможно возникновение серьезных аварий, подобных тем, что произошли в конце прошлого века в пик геомагнитной активности в северных районах США и Канады, а также в Швеции и Финляндии. Отказы оборудования в проводных транспортных и информационных системах привели к многомиллиардному экономическому ущербу [Bolduc, 2002].

В России не предусмотрена фиксация технологических нарушений, вызываемых ГИТ, поэтому нет достоверной информации о степени воздействия космической погоды на оборудование энергосистем. В 1987 г. был выполнен анализ аварий, причины которых не установлены, в трех энергосистемах: «Колэнерго», «Карелэнерго» и «Архэнерго» за четырехлетний период 1980–1984 гг. В результате была найдена корреляция между К-индексом, характеризующим уровень возмущения магнитного поля Земли в трехчасовом интервале, и отключениями в сетях по неустановленным причинам.

Устройства для измерения токов и напряжений, используемые в электрических сетях, являются трансформаторными преобразователями, поэтому не способны регистрировать сигналы почти постоянного тока. Для измерения квазипостоянных ГИТ в нейтральных трансформаторов традиционно используются либо резистивные токовые шунты, либо датчики тока на эффекте Холла [Watari et al., 2021]. Прямые измерения ГИТ в линиях электропередачи осуществить сложно, так как это связано с работами под высоким напряжением. Для таких измерений используют различные датчики магнитного поля: кварцевые, феррозондовые, квантовые или магниторезистивные [Hübert et al., 2020].

Кольский научный центр РАН совместно с Полярным геофизическим институтом с 1986 г. проводит работы по исследованию влияния геомагнитных бурь на состояние электрических сетей и трансформаторных подстанций на Кольском п-ве и в Карелии. В 2011 г. при содействии Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (ФСК ЕЭС) создана региональная система мониторинга токов в нейтральных трансформаторов, накопившая значительный массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на магистральную электрическую сеть протяженностью свыше 800 км [Bapanik et al., 2012]. Система включает в себя устройства регистрации ГИТ, установленные в нейтральных автотрансформаторов на подстанциях 330 кВ «Выходной» (Мурманская обл.), «Лоухи» и «Кондопога» (Республика Карелия), сервер сбора, хранения и обработки данных, веб-сервер [<http://eurisgic.ru>], магнитовариационную станцию LOZ (Ловозеро). В 2022 г.

создана и размещена в открытом доступе база данных, содержащая результаты измерений ГИТ в нейтралах автотрансформаторов на трех подстанциях 330 кВ магистральной электрической сети «Северный транзит» за период 2011–2022 гг. Получено свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации базы данных № 2022623220 «Геоиндуцированные токи в магистральной электрической сети «Северный транзит»».

В данной работе описаны принципы построения системы мониторинга и структура базы данных.

1. ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ГИТ протекают в протяженных наземных и подземных проводящих коммуникациях, имеющих гальваническую связь с землей не менее чем в двух пространственно разделенных точках. При характерной частоте от 0.001 до 0.1 Гц амплитуда ГИТ может достигать 300 А. В случае протекания практически постоянного тока в протяженной электрической сети с трансформаторами или автотрансформаторами с глухозаземленной нейтралью кривая намагничивания трансформаторов может сместиться, что приведет к полупериодному насыщению магнитопровода. Это вызывает нарушение симметрии передачи энергии по фазам, появление высших гармоник, перегрев стали сердечников и конструктивных элементов, резкий рост вибраций и в конечном итоге приводит к ускоренному старению изоляции силовых трансформаторов. Кроме того, при многократном воздействии на изоляцию возникает кумулятивный эффект, в результате которого трансформатор может повредиться при воздействиях, не связанных по времени с геомагнитными возмущениями.

Другими элементами энергосистемы, подверженными непосредственному влиянию ГИТ, являются трансформаторы тока (ТТ), сердечники которых могут также насыщаться при протекании постоянных токов [Пуляев, Усачев, 2002]. Это вызывает повышение погрешности ТТ, а также приводит к сильному искажению тока вторичной обмотки, что может вызвать как ложные срабатывания релейной защиты, так и снижение ее чувствительности и задержку реакции в аварийных ситуациях. Особенно сильному влиянию подвержены ТТ в нейтралах трансформаторов и шунтирующих реакторов, так как ГИТ в них может достигать трехкратной величины по сравнению с токами в фазных проводах. Исследования влияния ГИТ на ТТ и релейную защиту выполнены для подстанций Северной Америки, где во время сверхсильной геомагнитной бури в 1989 г. ГИТ достигали 200 А и приводили к насыщению сердечников ТТ за полупериод промышленного тока [Boteler, 2019; Vozoki et al., 1996].

Влиянию ГИТ подвержены также шунтирующие реакторы параллельной системы компенсации реактивной мощности. Их сердечники могут насыщаться при протекании ГИТ, что может вызвать местные перегревы конструктивных элементов реактора за счет возрастания потока рассеяния. Отключение реакторов в периоды геомагнитных возмущений

представляет опасность для обслуживающего персонала в связи с возможностью возникновения дугового перекрытия в месте разрыва и выделения энергии, накопленной в индуктивности реактора при протекании тока ГИТ.

Величина ГИТ в элементах электрической сети зависит от величины геоэлектрического поля на поверхности Земли, взаимного расположения подстанций, к которым подключены ЛЭП, сопротивлений проводов ЛЭП, обмоток трансформаторов и заземления нейтралей. Немаловажным фактором является разветвленность электрической сети, которая определяет пути растекания индуцированных в ней токов и их величину в конкретных элементах. На рис. 1 показаны пример однолинейной схемы разветвленной трехфазной электрической сети и возможные пути растекания ГИТ в ней. Ниже перечислены основные моменты, которые необходимо учитывать при анализе воздействия ГИТ на электрическую сеть.

1. Промышленные электрические сети являются трехфазными, токи протекают по трем параллельным цепям (фазам), в каждой из которых присутствуют одинаковые элементы — провода ЛЭП, силовые и измерительные трансформаторы, шунтирующие реакторы. ГИТ в нейтралах трансформаторов является суммой токов фаз, но воздействие на элементы оказывает именно ток, протекающий в одной фазе. С точки зрения оценки влияния на оборудование необходимо измерять именно ГИТ в каждой фазе, однако технически это сложно осуществить из-за высокого фазного напряжения.

2. К шинам подстанции могут быть подключены как один, так и несколько силовых трансформаторов. ГИТ, втекающий из ЛЭП, распределяется по всем подключенным к шинам подстанции трансформаторам. Чаще всего на подстанциях установлены два трансформатора (на Северном транзите это, например, подстанции 330 кВ «Серебрянская ГЭС», «Выходной», «Оленегорск», «Титан», «Лоухи»), но есть подстанции с одним трансформатором («Мурманская», «Князегубская», «Кондопога»), с четырьмя («Мончегорск») и с восемью («Кольская АЭС»). При измерении ГИТ в нейтрали одного из трансформаторов полученное значение необходимо умножить на количество подключенных в данный момент к шинам подстанции трансформаторов. Необходимо учитывать, что трансформаторы периодически отключают от сети для выполнения ремонтных и профилактических работ и тогда токи перераспределяются между оставшимися в работе трансформаторами.

3. ГИТ может циркулировать только в замкнутых контурах, связанных с землей не менее чем в двух пространственно разнесенных точках. Заземленными точками являются нейтрали трансформаторов, обмотки которых соединены в звезду. В сетях с изолированной нейтралью ГИТ протекать не могут. В России сети напряжением 6–35 кВ работают, как правило, в режиме изолированной нейтрали, поэтому не подвержены влиянию ГИТ. Кроме того, нейтрали некоторых трансформаторов напряжением 110 и 150 кВ также не заземляются для ограничения токов замыкания в сети. Эти трансформаторы могут быть исключены из анализа воздействия ГИТ.

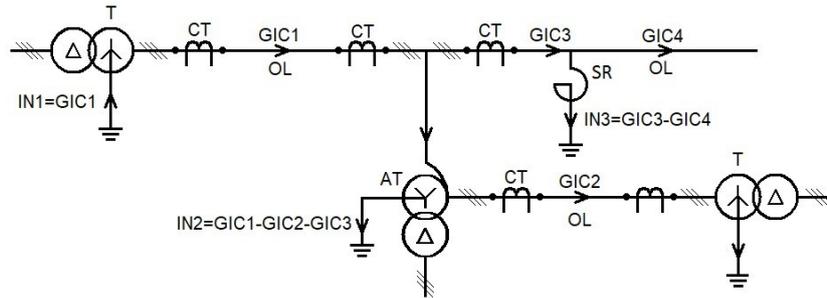


Рис. 1. Геоиндуцированные токи в разветвленной электрической сети: Т — трансформатор, АТ — автотрансформатор, СТ — трансформатор тока, SR — шунтирующий реактор, OL — линия электропередачи, GIC — геоиндуцированный ток, IN — ток в заземленной нейтрали

4. В полных трансформаторах обмотки разных классов напряжения гальванически не соединены между собой, поэтому ток в нейтрали равен суперпозиции фазных токов в обмотках трансформатора. В автотрансформаторах обмотки имеют ответвления, которые присоединены к электрическим сетям напряжений разных классов. ГИТ в нейтрали автотрансформатора является суммой токов, втекающих с воздушных линий, присоединенных и к первичным, и к вторичным обмоткам.

5. Необходимо учитывать способ подключения подстанции к сети с заземленной нейтралью. Если подстанция является тупиковой, ток, втекающий из ЛЭП, не разветвляется, а весь стекает в землю через нейтрали трансформаторов. К шинам проходных подстанций подключено несколько ЛЭП, в каждой из которых индуцируется собственный ГИТ. В зависимости от величины и направления ГИТ в этих линиях, ток в фазных обмотках трансформаторов может как суммироваться, так и вычитаться. Например, если проходная подстанция подключена к линиям, имеющим одинаковое направление и ГИТ в них примерно равны, то в соответствии с первым правилом Кирхгофа втекающий и вытекающий токи будут компенсировать друг друга, а ток в обмотках трансформатора и в его нейтрали будет равен нулю. В этом случае ГИТ в линиях будут воздействовать только на трансформаторы тока, а их влияние на силовые трансформаторы будет отсутствовать. В качестве примера можно привести проходные подстанции «Лоухи» и «Кондопога», присоединенные к магистральной линии, направленной с юга на север. В нормальном режиме работы ГИТ в нейтралях этих подстанций имеют малое значение. Однако если одна из присоединенных линий отключается для выполнения ремонтных работ во время геомагнитной бури, ГИТ в нейтрали резко возрастает, достигая нескольких десятков ампер.

Примером проходной подстанции со сложной конфигурацией электрической сети является подстанция 330 кВ «Выходной» (рис. 2). На подстанции установлены два автотрансформатора 330/150 кВ и подключено в общей сложности 12 воздушных линий различной длины и ориентации. На подстанции «Выходной» в периоды геомагнитных возмущений в нейтралю АТ-2 всегда регистрируются ГИТ значительной величины, так как не происходит ком-

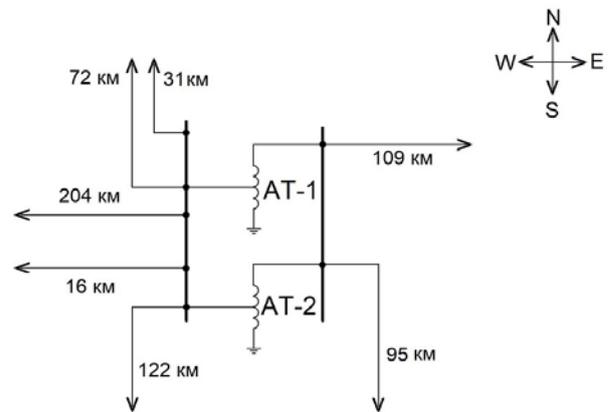


Рис. 2. Схема сети подстанции 330 кВ «Выходной»

пенсации токов, индуцируемых ортогональными компонентами геоэлектрического поля во взаимоперпендикулярных линиях.

2. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Геоиндуцированные токи в электрических сетях измеряют прямыми и косвенными методами. В нейтралях трансформаторов возможно непосредственное измерение тока контактным способом, с использованием токового шунта либо бесконтактным способом первичными преобразователями на эффекте Холла. В ЛЭП эти методы трудно реализуемы из-за высокого напряжения на проводах, поэтому применяют измерение магнитного поля, созданного током.

Контактный способ с использованием токового шунта позволяет измерять токи в широком частотном диапазоне, не требует внешнего питания, не вносит напряжения смещения и является самым распространенным и недорогим. Однако для его реализации требуется выполнить разрыв токовой цепи, при этом регистрируемый ток протекает по шунту, что вызывает поглощение мощности и, следовательно, нагрев шунта. Между токовой цепью и схемой преобразования сигнала отсутствует гальваническая развязка. Температурный коэффициент сопротивления токового шунта также вносит заметную погрешность в измерение ГИТ в условиях наружной

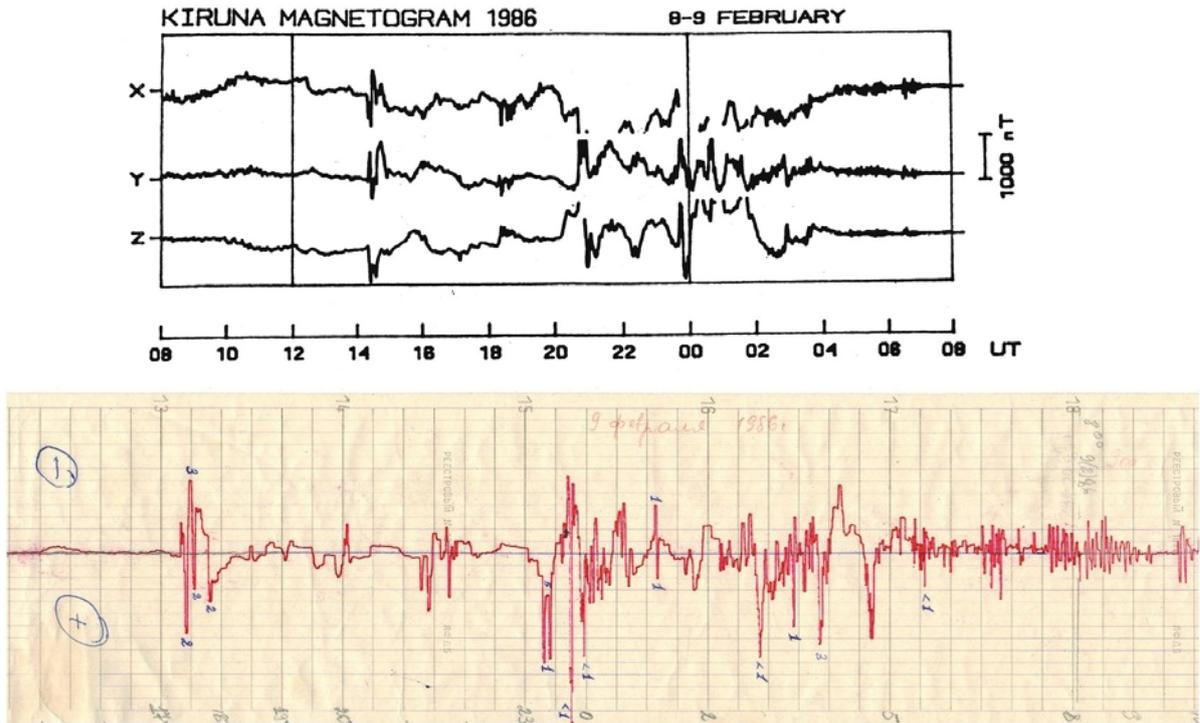


Рис. 3. Совмещенные во времени осциллограммы ГИТ в нейтрали трансформатора и магнитограммы вариаций МПЗ

установки в нейтрали трансформатора на открытой подстанции.

В одном из первых устройств регистрации ГИТ, реализованном в 1986 г. на подстанции 110 кВ в пос. Умба, в качестве шунта использовался пусковой резистор типа КФ сопротивлением 0.6 Ом, установленный в разрыв глухозаземленной нейтрали трансформатора. Падение напряжения от протекающего в шунте тока усиливалось и преобразовывалось в постоянный ток. Медленно изменяющийся сигнал регистрировался бумажным самописцем постоянного тока со скоростью записи 20 мм/ч.

В феврале 1986 г. наблюдалась сильная геомагнитная буря (планетарный K_p -индекс достигал 9), пик бури пришелся на 8–9 февраля 1986 г. [García, Dryer, 1987]. ГИТ в нейтрали трансформатора в Умбе достигли значения 40 А. На рис. 3 приведены совмещенные во времени осциллограммы ГИТ в нейтрали и магнитограммы вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) по данным шведской магнитосферной обсерватории в Кируне. Очевидно, изменения ГИТ в нейтрали достоверно коррелируют с вариациями МПЗ.

Для измерения ГИТ в нейтральных трансформаторов наилучшим решением является использование токовых клещей с датчиком Холла. Эти датчики предназначены для бесконтактного измерения постоянного, переменного и импульсного токов в широком диапазоне частот и амплитуд. Клещи смыкаются вокруг шины с током без разрыва цепи, обеспечивая гальваническую развязку между шиной нейтрали и электрическими цепями измерительного блока.

На рис. 4 показана структурная схема устройств измерения тока в нейтрали, на базе которых построена система мониторинга ГИТ в магистральной сети «Северный транзит». Система мониторинга позволяет

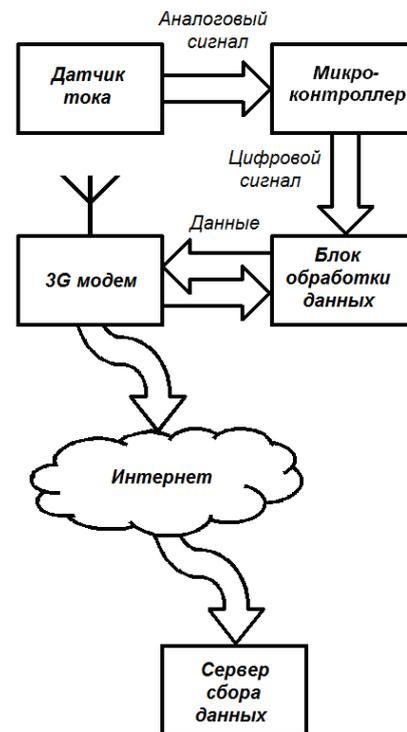


Рис. 4. Структурная схема устройства регистрации ГИТ

проводить регистрацию квазипостоянных токов в нейтральных трансформаторов, а также контролировать содержание гармоник в сети. Токоизмерительные клещи имеют аналоговый выход, напряжение на котором прямо пропорционально величине тока, протекающего через проводник. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой вид и дальнейшей обработки данных применен 8-битный микроконтроллер, имеющий в своем составе аналогово-цифровой

преобразователь. Микроконтроллер осуществляет преобразование сигнала по следующему алгоритму:

- десять раз в секунду производит выборку входного сигнала $i(t)$ и его дискретизацию с частотой $f_d=14400$ Гц. Длительность выборок составляет 100 мс;
- каждая выборка из 1440 дискретных отсчетов i_k используется для получения усредненных амплитуд постоянной составляющей, первой, второй и третьей гармоник сети $f=50$ Гц интегрированием на временном интервале 0.1 с.

Цифровой сигнал по кабельной линии передается в блок обработки, хранения и передачи данных. Непрерывный поток данных из микроконтроллера записывается в бинарные файлы, содержащие компоненты тока длительностью 1 ч. Записываются следующие составляющие полного тока в нейтрали, полученное разложением в ряд Фурье с интегрированием на временном интервале 0.1 с:

- Постоянная составляющая, несущая информацию непосредственно о ГИТ. Эта составляющая также содержит сигнал смещения нуля датчика тока, обусловленный остаточной индукцией в магнитопроводе токовых клещей и температурным дрейфом параметров электронных компонент.
- Амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоник, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ большой амплитуды. В нормальном режиме токи второй и третьей гармоник пренебрежимо малы, поэтому можно считать, что их рост обусловлен только искажением вследствие замагничивания магнитопровода трансформатора геоиндуцированными токами. Ток первой гармоники и в рабочем режиме может достигать ощутимых значений за счет различных несимметрий в энергосистеме и трансформаторе.

Кроме того, регистрируются мгновенные значения токов, протекающих в нейтральных при различного рода переходных процессах, например коммутациях, коротких замыканиях или грозовых воздействиях. Кривая тока содержит 256 точек при частоте дискретизации 14400 Гц, т. е. можно получить сигнал длительностью 18 мс (почти период промышленной частоты). Блок записи мгновенных значений срабатывает по условию превышения некоторого порогового значения производной от тока нейтрали в данный момент времени.

Каждый час набор файлов, содержащих компоненты тока в нейтрали, упаковывается и передается посредством сотовой связи на сервер сбора, хранения и дальнейшей обработки данных.

3. ОПИСАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ГИТ

Сервер данных представляет собой программно-аппаратный комплекс для приема, хранения, обработки и представления данных измерений ГИТ. В состав комплекса входят файловый сервер, система управления базами данных (СУБД) и веб-серверы.

На первом этапе архивы с данными в двоичном формате, каждый час поступающие через ftp-протокол

с устройств регистрации ГИТ, распаковываются в базу данных (БД) без предварительной обработки. В БД хранятся также исходные архивные файлы. На втором этапе производится объединение часовых файлов в суточные. Данные преобразуются из двоичного формата в текстовый и подвергаются обработке, которая включает в себя коррекцию базовой линии сигнала и уменьшение частоты дискретизации сигнала путем его децимации. В БД хранятся выборки данных с разным периодом дискретизации: 0.1 с (исходный сигнал с частотой дискретизации 10 Гц), 0.5 с (используется в БД «Геоиндуцированные токи в магистральной электрической сети «Северный транзит»»), 10 с (такой период дискретизации обычно имеют данные с магнитовариационных станций) и 60 с (используется для создания графических файлов).

На заключительном этапе данные преобразуются в графический формат, необходимый для визуального представления результатов в сети Интернет. С этой целью в рамках проекта European Risk from Geomagnetically Induced Currents (EURISGIS) [Viljanen, 2011] был разработан веб-сайт [<http://eurisgic.ru>], который предоставляет доступ к текущим и архивным данным измерений ГИТ, полученным с трансформаторных подстанций «Выходной», «Ревда», «Титан», «Лоухи» и «Кондопога», а также к информации о скорости изменения магнитного поля, полученной из обсерватории «Ловозеро» (LOZ).

В базе хранятся результаты измерения ГИТ за длительный период времени: данные с подстанции 110 кВ «Ревда» доступны с мая 2011 г., на подстанции 330 кВ «Титан» регистрация велась в период с июня 2010 г. по декабрь 2014 г., на подстанциях 330 кВ «Лоухи» и «Кондопога» устройства установлены в сентябре 2011 г., а на подстанции 330 кВ «Выходной» в октябре 2011 г. Поток данных не был непрерывным, поскольку в базе имелись достаточно продолжительные пропуски. Основными причинами потери данных были выход из строя оборудования (за весь период регистрации пришли в негодность четыре накопителя на жестких дисках), отключение питания устройств из-за постороннего вмешательства, повреждение кабельных линий при проведении персоналом работ на подстанциях, проблемы с передачей данных (подстанции «Лоухи» и «Кондопога» находятся в зонах неуверенного приема сигнала сотовой связи). Количество дней, данные по которым есть в БД, можно увидеть в табл. 1.

На сайте eurisgic.ru доступны только графические изображения данных. Для того чтобы данные мониторинга использовались более широким кругом исследователей, была создана база машиночитаемых данных в виде сетевого ресурса [<http://gic.en51.ru>]. Эта БД содержит результаты измерений ГИТ в нейтральных автотрансформаторов на трех подстанциях 330 кВ магистральной электрической сети «Северный транзит» («Выходной», «Лоухи» и «Кондопога») за период 2011–2022 гг. По запросу, сформированному с помощью html-формы, данные за выбранные сутки могут быть извлечены из БД в виде либо текстового файла, содержащего результаты измерений ГИТ с периодом выборки 0.5 с, либо графического с кривой

Таблица 1

Количество дней в БД по годам и подстанциям

Год	«Выходной»	«Ревда»	«Титан»	«Лоухи»	«Кондопога»
2010	0	0	183	0	0
2011	38	114	301	168	178
2012	366	325	286	253	366
2013	365	365	358	365	365
2014	365	365	286	365	365
2015	365	279	0	365	340
2016	366	366	0	366	337
2017	365	116	0	365	365
2018	343	365	0	106	365
2019	365	365	0	71	365
2020	366	304	0	366	366
2021	365	283	0	365	365
2022	365	262	0	365	365
Итого	4034	3509	1414	3520	4142

амплитуды ГИТ. В базе содержатся свыше 20000 текстовых и графических файлов, сгруппированных по типам и подстанциям в шести папках общим объемом свыше 50 Гб.

При необходимости текстовый файл может быть загружен на локальный носитель под именем SSSYYYYMMDD.txt, где SSS — идентификатор подстанции (vkh — «Выходной», lkh — «Лоухи», kno — «Кондопога»), YYYY — год, MM — месяц, DD — день. Например, файл vkh20140325.txt содержит данные, записанные регистратором ГИТ 25 апреля 2014 г. на подстанции «Выходной».

Данные в текстовом файле представлены в формате YYYY MM DD hh mm ss.s П.П, где YYYY — год, MM — месяц, DD — день, hh — час, mm — минута, ss — секунда, П — ток в амперах. Суточный файл содержит 172800 строк, размер файла 4921138 б. Например, ниже приведен фрагмент текстового файла с первой, промежуточной и последней записями:

```
2021 03 01 00 00 00.0 0.07;
2021 03 01 19 41 17.0 25.01;
2021 03 01 23 59 59.5 -0.32.
```

Графические файлы могут быть загружены также в виде растрового изображения в формате png размером 556×228 пкс. Маски имени графического и текстового файлов совпадают.

Ниже приведены примеры графических файлов, демонстрирующие некоторые особенности данных, полученные системой регистрации ГИТ, которые необходимо учитывать при обработке и анализе этих данных.

Датчики тока на эффекте Холла бывают с открытой петлей (прямого усиления) и закрытой (компенсационные). Преимуществом компенсационных датчиков является отсутствие напряжения смещения выходного сигнала и низкий температурный дрейф. Для системы регистрации ГИТ в нейтрали трансформаторов на подстанциях «Выходной» и «Лоухи» мы выбрали недорогие клещи-адаптер с датчиком Холла открытого типа. Для уменьшения температурного дрейфа в измерительном модуле установлен нагревательный элемент для поддержания постоян-

ной температуры 30 °С. Управляется нагревательный элемент по интегральному закону регулирования, для которого характерны колебания регулируемой величины около заданного значения. На рис. 5 показан характерный сигнал от датчика ГИТ, генерируемый в процессе работы блока терморегулирования. Амплитуда сигнала составляет ~0.1 А, период ~1 ч. На подстанции «Кондопога» установлен компенсационный датчик Холла, поэтому такого эффекта нет.

Еще одной особенностью датчиков Холла открытого типа является смещение нуля, обусловленное остаточной индукцией в измерительном магнитопроводе токовых клещей. Это систематическая погрешность, которая устраняется на этапе программной обработки сигнала (коррекция базовой линии). Однако в электрических сетях регулярно возникают переходные процессы, которые сопровождаются протеканием сильных токов в нейтрали трансформатора: аварийные и плановые коммутации воздушных линий, силовых трансформаторов и нагрузок, короткие замыкания и неполнофазные режимы в сети. Резкое изменение тока в нейтрали приводит к перемагничиванию магнитопровода токовых клещей и смещению нулевой линии. На рис. 6 показано, как выглядит сигнал после процедуры коррекции базовой линии.

Необходимо также отметить, что датчики тока имеют ограниченный измерительный диапазон: на подстанциях «Лоухи» и «Кондопога» он установлен на уровне ± 62.5 А, на подстанции «Выходной» — ± 125 А. При токах, превышающих эти значения, возникает перегрузка операционных усилителей по уровню входного сигнала, ограниченного напряжением питания, и операционный усилитель входит в режим амплитудного ограничения сигнала (клиппирование). На рис. 7 в качестве примера выбран день 29 июня 2013 г., когда во время мощной геомагнитной бури на фазе восстановления [Apatenkov et al., 2020] ток в нейтрали трансформатора на подстанции «Выходной» превысил амплитудный диапазон измерительных клещей 125 А. Такое превышение

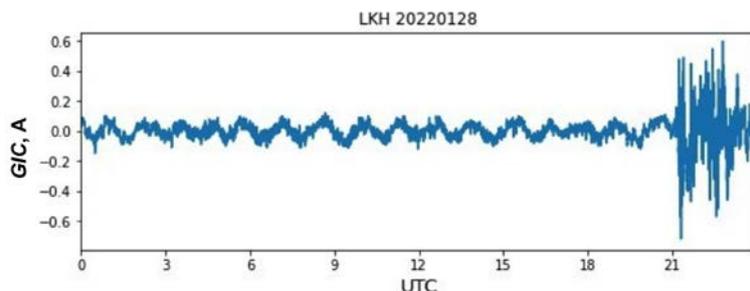


Рис. 5. Температурные колебания сигнала

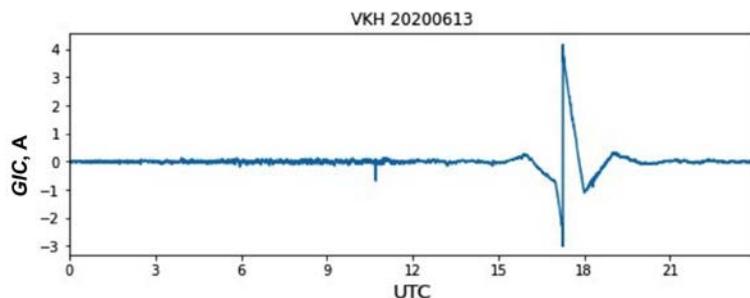


Рис. 6. Смещение нулевой линии

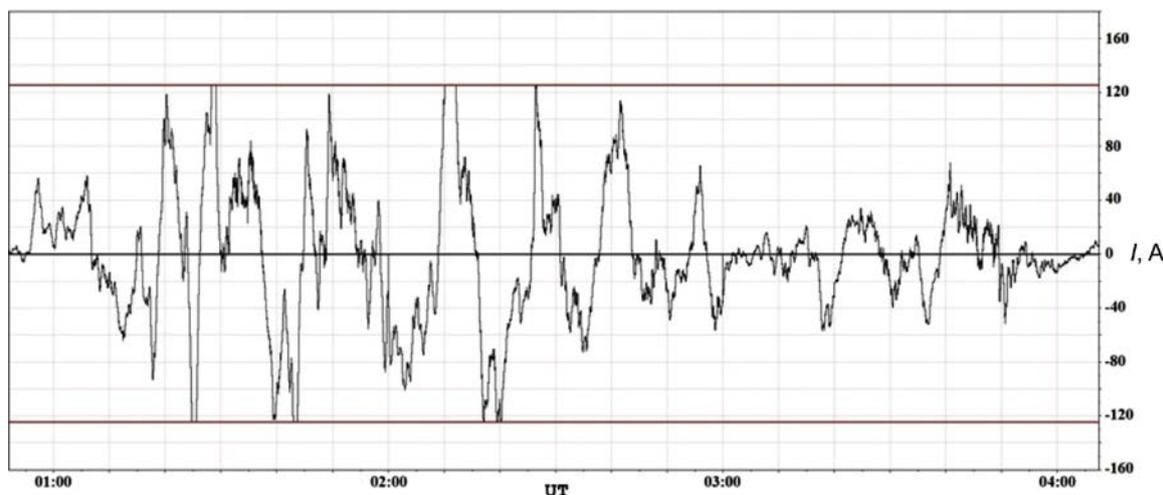


Рис. 7. Клиппирование сигнала (29 июня 2013 г.)

прогнозируемого тока стало возможным из-за того, что в этот день один из двух трансформаторов подстанции был выведен в ремонт и весь ток протекал в обмотках трансформатора, в нейтрали которого установлен датчик ГИТ.

На подстанциях «Выходной» и «Лоухи» установлено по два силовых трансформатора, а на подстанции «Кондопога» — один. Периодически трансформаторы и воздушные линии на подстанциях отключаются для проведения ремонтных и профилактических работ. Если отключается трансформатор, в нейтрали которого установлен датчик ГИТ (первый), сигнал с этого датчика будет содержать только шумы и наведенные в обмотках трансформатора помехи от соседнего оборудования, так как в нейтрали этого трансформатора ток отсутствует. Пример такой записи показан на рис. 8.

Если же отключается или включается второй трансформатор, ток в нейтрали первого трансфор-

матора скачком изменяет свое значение, как показано на рис. 9. Аналогичное скачкообразное изменение сигнала можно наблюдать при включении или отключении от шин подстанции воздушных линий электропередачи. К шинам подстанции «Выходной» подключено 13 воздушных линий, на подстанции «Лоухи» — 6, на подстанции «Кондопога» — 4. Любое изменение топологии сложной электрической сети приводит к перераспределению токов в ее ветвях и узлах, что необходимо учитывать при анализе БД ГИТ.

4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БД ГИТ

БД ГИТ содержит записи с середины 2011 до конца 2022 г. В табл. 2 дана краткая сводка 24-го и 25-го циклов солнечной активности, вызвавших относительно высокие ГИТ в нейтральных трансформаторов

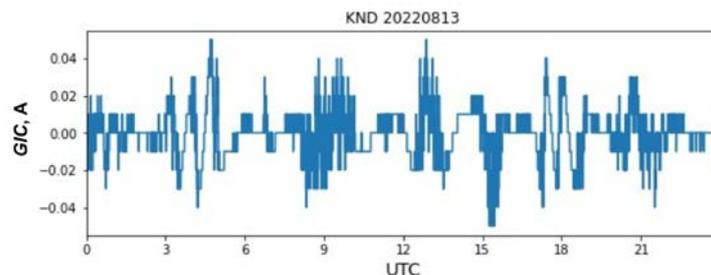


Рис. 8. Ток в нейтрали отключенного трансформатора

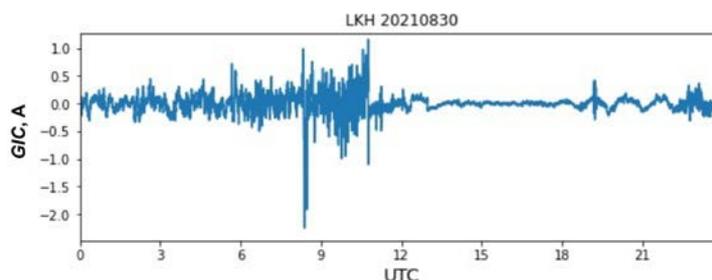


Рис. 9. Изменение ГИТ в нейтрали трансформатора при изменении топологии электрической сети

Таблица 2

События 24-го и 25-го солнечных циклов с большими значениями ГИТ

Даты	К-индекс «Ловозеро»	Амплитуда ГИТ на подстанции, А		
		«Выходной»	«Лоухи»	«Кондопога»
25 октября 2011 г.	7	19.0	7.1	34.8
15 марта 2012 г.	6	23.1	нет данных	10.2
24 апреля 2012 г.	8	46.4	3.2	4.3
1 октября 2012 г.	8	25.7	18.5	4.8
9 октября 2012 г.	8	30.2	7.2	28.2
17 марта 2013 г.	7	49.2	4.7	12.0
27 марта 2013 г.	7	62.8	6.3	5.1
1 июня 2013 г.	8	51.6	5.5	3.9
7 июня 2013 г.	8	59.3	7.7	4.1
29 июня 2013 г.	8	125.0	6.5	33.7
2 октября 2013 г.	8	56.4	19.3	7.5
17 марта 2015 г.	8	72.9	6.1	24.0
7–10 сентября 2015 г.	9	51.1	54.6	32.7
2 сентября 2016 г.	8	94.4	6.1	2.8
28 мая 2017 г.	8	49.4	8.1	10.0
8 сентября 2017 г.	9	92.3	31.5	22.9
24 апреля 2023 г.	8	52.3	9.7	22.6

на подстанциях магистральной сети 330 кВ «Северный транзит».

В нормальном режиме работы электрической сети, когда в работе находятся все воздушные линии и трансформаторы, ГИТ на подстанции «Выходной» примерно на порядок превышают токи на подстанциях «Лоухи» и «Кондопога». Это связано с топологией электрической сети и ориентацией воздушных линий относительно вектора возмущения горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Если входящие и уходящие от промежуточной подстанции воздушные линии не меняют глобально своего направления, как на подстанциях «Лоухи», «Выходной» и других промежуточных подстанциях сети «Северный транзит», втекающие и вытекающие

из нейтрали трансформатора ГИТ компенсируют друг друга и результирующие токи малы. На подстанции «Выходной» воздушные линии меняют свое направление с меридионального на широтное. ГИТ в перпендикулярных линиях как правило существенно различаются вследствие различия действующих компонент геомагнитного поля, что приводит к высоким значениям результирующих ГИТ в нейтрали трансформатора.

Например, во время события 7–10 сентября 2015 г. воздушная линия, уходящая на юг от подстанции «Лоухи», была отключена, поэтому в нейтрали трансформатора протекал только ток из воздушной линии, приходящей с севера. Это объясняет большой ток на этой подстанции, а равенство токов на подстан-

циях «Выходной» и «Лоухи» является следствием пространственной однородности геомагнитного возмущения над территорией прохождения сети «Северный транзит».

В работе [Belakhovsky et al., 2018] авторы применили векторную технику представления вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля и его производной к описанию variability геомагнитного поля во время магнитной бури 17 марта 2013 г. Были сопоставлены данные магнитных станций сети IMAGE и данные из БД ГИТ в линиях электропередачи на Кольском п-ве и Карелии. Векторная техника показала гораздо меньшую variability горизонтальной компоненты геомагнитного поля по сравнению с его производной. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета полей мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ. Таким образом, ГИТ представляют опасность для технологических систем, ориентированных не только в широтном направлении, но и в долготном.

Самые высокие значения ГИТ были зарегистрированы во время основной фазы магнитной бури 28–29 июня 2013 г. В исследовании [Apatenkov et al., 2020] на основе анализа наземных магнитных наблюдений и данных из базы ГИТ, реконструкции ионосферных токов и авроральных данных авторы пришли к выводу, что авроральные омега-сигналы являются важным механизмом генерации сильных вариаций магнитного поля и геоиндуцированных токов из-за быстрого распространения ионосферных токов в азимутальном направлении.

В работе [Дэспирак и др., 2022] исследовано несколько событий регистрации интенсивных ГИТ в двух системах мониторинга: в магистральной сети «Северный транзит» и на газопроводе вблизи города Мянтсяля (Финляндия). Использование двух разных систем регистрации ГИТ, расположенных в авроральной и субавроральной зонах, позволило проследить возникновение и распространение ГИТ от субавроральных до высоких геомагнитных широт и сравнить их с движением суббуревого западного электроджета. Для исследования были выбраны два события — 15 марта 2012 и 17 марта 2013 г., когда наблюдались интенсивные ГИТ на подстанциях «Мянтсяля» и «Выходной». Показано, что развитие ГИТ на меридиональном профиле наблюдений происходило в соответствии с развитием тонкой пространственно-временной структуры суббури. Найдена хорошая корреляция между появлением ГИТ и увеличением геомагнитных индексов IL (показывает интенсивность западного электроджета на меридиане IMAGE) и W_p (характеризует волновую активность суббури).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛЭП являются гигантскими антенными системами, улавливающими электромагнитные волны на большой территории. Измерение стекающих из линий в землю токов позволяет проводить сбор и анализ данных, прямо или косвенно характеризующих раз-

личные внешние воздействия при работе электрических сетей и исследовать их реакцию на эти воздействия. Экспериментальные данные о воздействии геомагнитных возмущений на наземные технические объекты представляют большую практическую и научную ценность — они являются доказательством взаимосвязи между возмущениями магнитного поля Земли и нарушениями функционирования систем, а также косвенным методом исследования процессов в ионосфере Земли.

Непрерывная регистрация ГИТ в нейтралах нескольких трансформаторов на протяжении более 11 лет позволила получить качественно новую информацию о воздействии ГИТ на оборудование подстанций в периоды сильных и умеренных возмущений. Накопленная с 2011 г. и пополняемая в режиме реального времени БД уже сейчас используется большим коллективом ученых — геофизиков и энергетиков — для получения важных сведений о явлениях в ионосфере и влиянии космической погоды на технологические системы.

База данных находится в открытом доступе [<http://gic.en51.ru>]. При ее использовании авторы просят сослаться на данную статью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00413, [<https://rscf.ru/project/22-29-00413/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. *Солнечно-земная физика*. Т. 2. М.: Мир, 1975. 512 с.
- Гершенгорн А.И. Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем. *Электрические станции*. 1993. № 6. С. 54–63.
- Дэспирак И.В., Сецко П.В., Сахаров Я.А. и др. Наблюдения геомагнитных индуцированных токов на северо-западе России: отдельные случаи. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2022. Т. 62, № 6. С. 721–733. DOI: [10.31857/S0016794022060037](https://doi.org/10.31857/S0016794022060037).
- Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 72–110. DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).
- Пуляев В.И., Усачев Ю.В. Магнитная буря — причина отключения ВЛ 330 кВ. *Энергетик*. 2002. № 7. С. 18–20.
- Abda Z.M.K., Aziz N.F.A., Kadir M.Z.A.A., Rhazali Z.A. Review of geomagnetically induced current effects on electrical power system: principles and theory. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 200237–200258. DOI: [10.1109/access.2020.3034347](https://doi.org/10.1109/access.2020.3034347).
- Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I., et al. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, no. 6. e2019GL086677. DOI: [10.1029/2019GL086677](https://doi.org/10.1029/2019GL086677).
- Barannik M.B., Danilin A.N., Kat'kalov Yu.V., et al. A system for recording geomagnetically induced currents in neutrals of power autotransformers. *Instruments and Experimental Techniques*. 2012. Vol. 55, no. 1. P. 110–115. DOI: [10.1134/S00441211060121](https://doi.org/10.1134/S00441211060121).
- Belakhovsky V.B., Sakharov Y.A., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. Characteristics of the variability of a geomagnetic field for studying the impact of the magnetic storms and substorms on electrical energy systems. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2018. Vol. 54, no. 1. P. 52–65. DOI: [10.1134/S1069351318010032](https://doi.org/10.1134/S1069351318010032).
- Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2002. Vol. 64, no. 16. P. 1793–1802. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00128-1).

Boteler D.H. A twenty - first century view of the March 1989 magnetic storm. *Space Weather*. 2019. Vol. 17, iss. 10. DOI: [10.1029/2019SW002278](https://doi.org/10.1029/2019SW002278).

Bozoki B., Chano S.R., Dvorak L.L., et al. The effects of GIC on protective relaying. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 1996. Vol. 11, no. 2. P. 725–739. DOI: [10.1109/61.489329](https://doi.org/10.1109/61.489329).

Coster A.J., Erickson P.J., Lanzerotti L.J., et al. Space Weather Effects and Applications. Geophysical Monograph Ser.. 2021. DOI: [10.1002/9781119815570](https://doi.org/10.1002/9781119815570).

Garcia H.A., Dryer M. The solar flares of February 1986 and the ensuing intense geomagnetic storm. *Solar Phys*. 1987. Vol. 109, no. 1. P. 119–137. DOI: [10.1007/bf00167403](https://doi.org/10.1007/bf00167403).

Hübert J., Beggan C.D., Richardson G.S., et al. Differential magnetometer measurements of geomagnetically induced currents in a complex high voltage network. *Space Weather*. 2020. Vol. 18, iss. 4. P. e2019SW002421. DOI: [10.1029/2019sw002421](https://doi.org/10.1029/2019sw002421).

Kappenman J.G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms. *Space Weather*. 2005. Vol. 3, iss. 8. P. S08C01. DOI: [10.1029/2004sw000128](https://doi.org/10.1029/2004sw000128).

Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., et al. Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 7. P. 828–856. DOI: [10.1002/2016SW001501](https://doi.org/10.1002/2016SW001501).

Viljanen A. European project to improve models of geomagnetically induced currents. *Space Weather*. 2011. Vol. 9, iss.7. P. S07007. DOI: [10.1029/2011SW000680](https://doi.org/10.1029/2011SW000680).

Watari S., Nakamura S., Ebihara Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan. *Earth Planets and Space*. 2021. Vol. 73, no. 102. DOI: [10.1186/s40623-021-01422-3](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3).

Zheng K., Boteler D., Pirjola R.J., et al. Effects of system characteristics on geomagnetically induced currents. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2014. Vol. 29, iss. 2. P. 890–898. DOI: [10.1109/tpwr.2013.2281191](https://doi.org/10.1109/tpwr.2013.2281191).

URL: <http://gic.en51.ru> (дата обращения 15 апреля 2023 г.).

URL: <http://eurisgic.ru> (дата обращения 15 апреля 2023 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/22-29-00413/> (дата обращения 15 апреля 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А., Колобов В.В., Сахаров Я.А. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит». *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 100–110. DOI: [10.12737/szf-93202311](https://doi.org/10.12737/szf-93202311).