

### Список литературы

1. Григорьев А. В. Перспективная судовая единая электроэнергетическая установка / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 68–70.
2. Григорьев А. Судовой полупроводниковый преобразователь нового поколения / А. Григорьев, А. Колпаков, Ю. Кулагин [и др.] // Силовая электроника. — 2010. — № 4. — С. 47–50.
3. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 76–78.
4. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые подруливающие устройства / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2012. — № 1. — С. 42–45.
5. Григорьев А. В. Сравнительный анализ современных и перспективных судовых подруливающих устройств / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 4 (66). — С. 57–61.
6. Григорьев А. В. Частотно-регулируемый электропривод судового подруливающего устройства на базе обратимого преобразователя / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, Р. В. Митрофанов // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 1 (67). — С. 50–54.
7. Григорьев А. В. Судовая система электродвижения нового поколения / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 2. — С. 38–40.
8. Григорьев А. В. Судовые подруливающие устройства нового поколения / А. В. Григорьев // Судостроение. — 2012. — № 3. — С. 52–55.
9. Григорьев А. В. Судовые подруливающие устройства / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 5. — С. 32–34.
10. Григорьев А. В. Судовые системы электродвижения на базе кольцевых электродвигателей / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, С. М. Малышев // Морской вестник. Спецвыпуск. — 2013. — № 2 (11). — С. 60–61.

УДК 621.311, 537.67

**Н. В. Родимов,**  
асп.;

**А. С. Сероветников,**  
науч. сотр.;

**В. П. Сивоконь,**  
д-р техн. наук, проф.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОРСКОЙ ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ПРИПОЛЯРНОМ РАЙОНЕ

### INVESTIGATION OF RELIABILITY FACTOR OF POWER SUPPLY OF PORT'S INFRASTRUCTURE IN SUBPOLAR AREAS

*В полярных и приполярных районах велика вероятность деструктивного проявления геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), которые могут привести к коллапсу энергосистемы, как это было в Канаде в 1989 г. Следовательно, имеется необходимость мониторинга ГИТ и принятия мер по снижению его влияния на надёжность функционирования энергосистем. Для мониторинга ГИТ авторы используют вариации гармоник напряжения сети в сопоставлении с индексами магнитного поля Земли. На примере Петропавловск-Камчатского морского порта приводятся результаты наблюдений, в ходе которых зафиксировано увеличение уровня гармоник напряжения как следствие магнитной бури. Сопутствующим фактором проявления ГИТ является*

насыщение сетей нелинейными потребителями и, как следствие, рост высших гармоник. В этой ситуации наиболее уязвимым для геомагнитно-индуцированных токов элементом является трансформатор. В связи с этим представлена оценка надёжности силового трансформатора как элемента энергетической системы, имеющей тенденцию насыщения нелинейными потребителями на фоне деструктивного проявления геомагнитно-индуцированных токов. Рассматриваются предложения, способные нейтрализовать деструктивное проявление геомагнитно-индуцированных токов в электротехнических системах.

*In polar and subpolar regions high probability destructive manifestations of geomagnetic induced currents (GIC), which may lead to the collapse of the energy system, as it was in Canada in 1989. Therefore, there is need to monitor and GIC adoption of measures to reduce its impact on the reliability of the operation of power systems. For monitoring GIC authors use variations in voltage harmonics compared with the indices of the magnetic field of the Earth. For example, Petropavlovsk-Kamchatsky seaport, the results of observations, in which registered an increase in the level of voltage harmonics as a result of the magnetic storm. The concomitant factor of manifestation GIC is to saturate network nonlinear consumers and, consequently, the growth of the higher harmonics. In this situation, the most vulnerable to geomagnetic induced currents element is a transformer. In this connection, presents an assessment of reliability of the power transformer, as part of the energy system, tending to saturation nonlinear consumers against the background of the destructive manifestations of geomagnetic induced currents. Considering proposals are able to neutralize the destructive manifestation of geomagnetic induced currents in electrical systems.*

*Ключевые слова: геоиндуцированные токи, электроджет, чётные гармоники, качество электрической энергии, функция надёжности.*

*Key words: geo-induced currents, electrojet, even harmonics, electric energy quality, reliability function.*

**В** СООТВЕТСТВИИ с приказом Минтранса России от 30.07.2010 № 167 ФГУП «Росморпорт» разработан проект документа «Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г.» (далее — Стратегия). Проект Стратегии одобрен на совещании членов Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации (протокол от 28.09.2012 № 2 (18)). Во втором квартале 2015 г. на заседании Правительства Российской Федерации запланировано обсуждение доработанного проекта Стратегии. В рамках Стратегии производится разработка проектной документации на реконструкцию морских терминалов, расположенных в различных морских портах [1], в том числе — Петропавловске-Камчатском.

Одним из основных положений Стратегии является обязательное повышение эффективности и надёжности электроснабжения предприятий морской отрасли при осуществлении их реконструкции, в связи с чем актуальным является вопрос повышения энергоэффективности и надёжности функционирования Петропавловск-Камчатского морского порта (далее — порт). Порт открыт для захода судов круглый год и способен принимать суда длиной до 200 м, шириной до 25 м и с осадкой до 9 м. Порт имеет 12 причалов. На рис. 1 показана схема акватории и территории морского порта г. Петропавловск-Камчатский. Цифрами обозначены пирсы.

В соответствии с государственной программой «Развитие судостроения на 2013 – 2030 гг.» в целях модернизации порта предполагается создание территории опережающего социально-экономического развития «Камчатка», в рамках которой предполагается построить современный транзитно-контейнерный порт-хаб и опорную береговую инфраструктуру в северо-восточной части Северного морского пути. Новые мощности увеличат пропускную способность до 500 тыс. судов в год. Порт сможет принимать суда любого класса, а круизные лайнеры смогут швартоваться у нового здания морского вокзала.

На сегодняшний день порт содержит комплекс сооружений, устройств для причаливания, разгрузки / погрузки судов, перегрузки грузов с одного вида судна на другой, складирования грузов, обработки грузов (сортировки, упаковки, заморозки и таможенного досмотра), а также рефрижераторные установки для хранения морепродуктов, снабжения судов и их ремонта, службы навигации и сопровождения судов, питания судов с берега при стоянке в порту. Обеспечение качественного функционирования всей инфраструктуры такого предприятия в большой степени зависит от качества электрической энергии, подаваемой на соответствующие объекты.

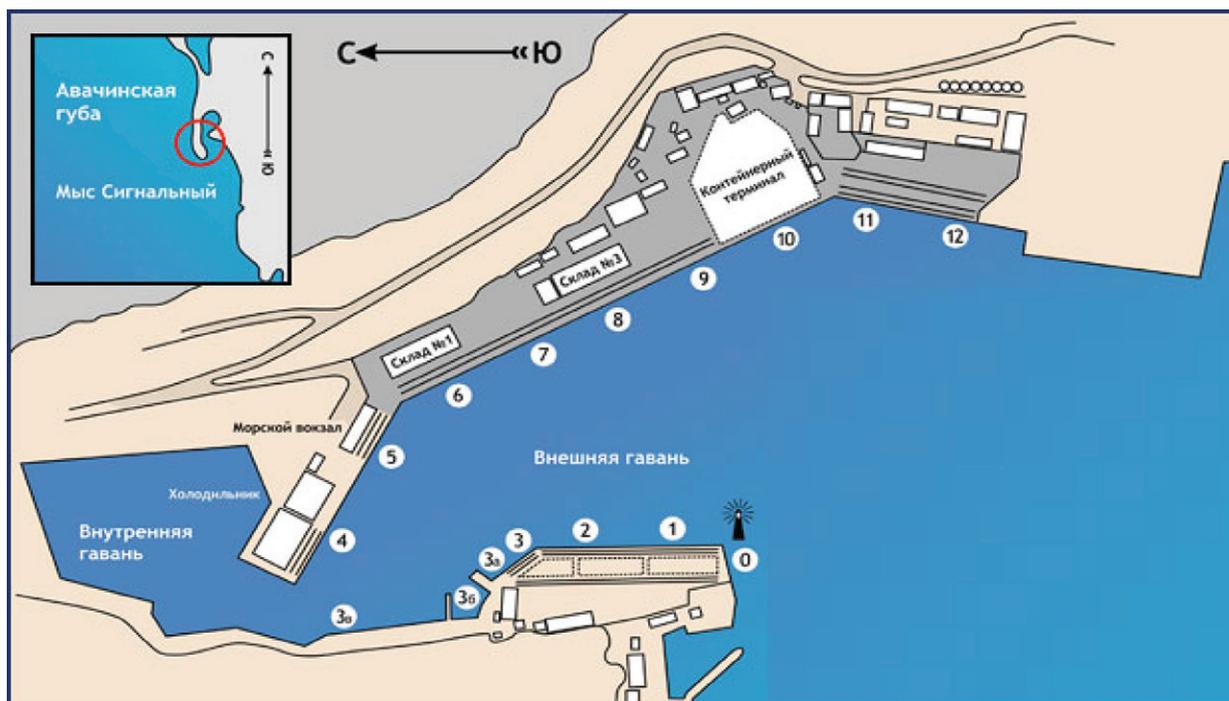


Рис. 1. Схема акватории и территории морского порта г. Петропавловск-Камчатский

Электроснабжение в порту, как правило, схоже с электроснабжением небольшого завода, но вместе с тем имеются свои особенности, связанные с большой протяженностью и разветвленностью электрических сетей, необходимых для его круглосуточного обеспечения. При этом энергетические решения, основанные на береговой инфраструктуре, часто включают всю цепочку, начиная с входящей подстанции, трансформаторов и преобразователей частот для приведения судовой электросети в соответствие с напряжением и частотой общей электросети при питании судна с берега. Такие решения позволяют осуществлять одновременное подключение нескольких судов с частотой 50 или 60 Гц независимо от частоты местной сети.

Согласно нормативным документам по электрификации береговых зданий и сооружений и Правилам эксплуатации электрооборудования на судах флота рыбной промышленности России при электроснабжении портовой инфраструктуры, а также при стоянке и электроснабжении судов в портах от береговых сетей следует руководствоваться действующими в данных портах инструкциями, правилами техники безопасности, правилами пожарной безопасности и правилами устройства электроустановок. Правилами предусмотрено, что при увеличении мощностей вопрос надёжности и качества электрической энергии является основополагающим.

Одним из параметров качества электроэнергии является гармонический состав тока и напряжения. Величина собственных гармонических составляющих обусловлена, как правило, нелинейными нагрузками в виде грузовых судовых и береговых механизмов, трансформаторов, различного рода преобразователей напряжения и преобразователей частот, подключаемых к электрическим сетям различного напряжения. Эти составляющие способны вызывать падение напряжения на полных сопротивлениях электрических сетей, что может приводить к дополнительным потерям мощности в береговых сетях морского порта.

Наряду с этими деструктивными факторами имеются высшие гармоники, обусловленные геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). ГИТ — природное явление, обусловленное солнечно-земными связями. Взаимодействие магнитосферы Земли с потоком солнечного ветра приводит к вариациям естественной ионосферной токовой структуры — электроджета. В результате по наземным протяженным токопроводящим системам начинают циркулировать токи с частотой ниже 1 Гц. Цепью протекания индуцированных токов являются заземленные нейтрали силовых трансформаторов, что

приводит к подмагничиванию сердечника и сдвигу рабочей точки в область нелинейного режима. При этом в спектре тока и напряжения увеличиваются составляющие высших порядков. В настоящее время получено большое количество сведений об авариях и отказах электроэнергетических систем, вызванных данным явлением [2]. Предположительно, более половины отключений линий электропередач и ложного срабатывания релейной защиты и автоматики в системах электроснабжения, причины которых остались невыясненными, могли быть обусловлены проявлением ГИТ [3].

Авторами разработан способ мониторинга ГИТ [4], основанный на анализе вариаций высших гармоник напряжения. На основании решения Совета по науке и инновациям при Губернаторе Камчатского края организованы наблюдения на различных участках электросети Камчатского края, что позволило успешно апробировать разработанный подход и показать связь уровня гармоник напряжения с вариациями магнитного поля Земли [5]. Моделирование силового трансформатора в условиях протекания ГИТ в его обмотках [6] показало, что гармоники напряжения четных порядков могут использоваться в качестве индикатора ГИТ. В качестве примера использования разработанного подхода приведём анализ проявления возмущений магнитного поля Земли в электросети Камчатки в период 16 – 18 марта 2015 г. В этот период произошла геомагнитная буря, которая начала развиваться 17 марта в 16 ч по мировому времени (*UTC*) и продолжалась вплоть до 18 марта, до 11 ч *UTC*. Особенностью данного события является то, что максимум возмущения магнитного поля Земли пришелся на ночь, когда нагрузка минимальна, а пространственное положение электроджета способствует максимальному его проявлению в электрических сетях Камчатки.

Вначале для оценки состояния магнитного поля Земли используем вариации индекса магнитного поля *Dst*. Сопоставим вариации индекса с уровнем четных гармоник, рис. 2.



Рис. 2. Сопоставление *Dst* и уровня четных гармоник сети

Из рис. 2 видно совпадение в поведении уровня гармоник и индекса *Dst* в момент начала магнитной бури. Для детализации процессов сопоставим уровень гармоник с вариациями горизонтальной компоненты магнитного поля Земли *H*, поскольку данные по гармоникам имеют минутное усреднение, а *Dst* — часовое (рис. 3).

Как видно из рис. 3, графики отражают ту же связь, что и сравнение с *Dst*, но взаимосвязь процессов прослеживается и на более поздних стадиях геомагнитной бури. Таким образом, четные гармоники можно рассматривать в качестве индикатора проявления геомагнитно-индуцированных токов в энергетических системах.

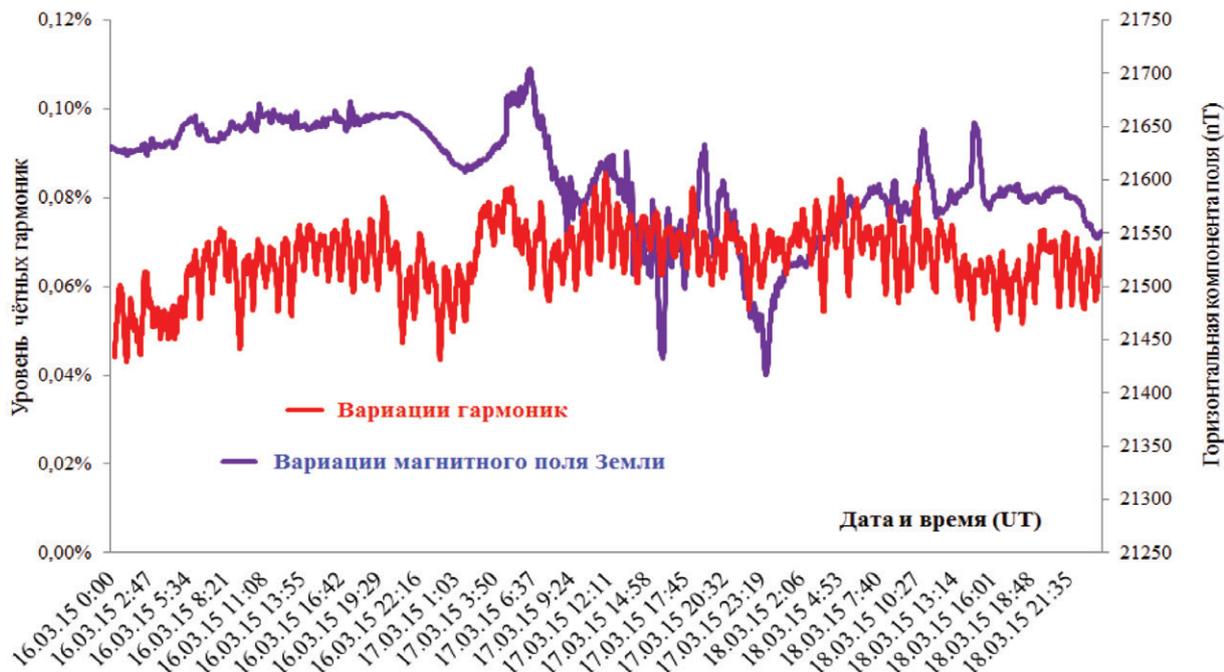


Рис. 3. Сопоставления вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля Земли и уровня чётных гармоник напряжения сети

Из приведённого анализа следует, что негативное воздействие ГИТ на элементы систем электроснабжения необходимо учитывать при проведении проектирования и реконструкции терминалов порта как неотъемлемый элемент совершенствования системы питания морских судов с берега, оборудование которых чувствительно к проявлению высших гармоник сети.

Таким образом, надёжность электроэнергетических систем порта зависит от внешних (в данном случае геомагнитно-индуцированных) токов и внутренних возмущающих факторов. Основными источниками питания инфраструктуры порта являются трансформаторные подстанции, одновременно они же являются главным объектом проявления ГИТ. Большинство отключений потребителей, а соответственно, и сокращение срока службы трансформаторов, происходит в результате дополнительного нагрева изоляции обмоток из-за дополнительных потерь активной мощности, возникающих из-за протекания токов высших гармоник, величина которых, как уже было показано, зависит, в том числе, от ГИТ [6].

По рекомендациям Российского национального комитета по вопросам электроэнергетики СИГРЭ для определения срока службы трансформатора необходимо рассчитывать температуру наиболее нагретой точки обмотки трансформатора. Таким образом, для расчёта надёжности трансформатора необходимо определять дополнительный нагрев изоляции трансформатора  $\Delta t$ , для чего следует учитывать дополнительные потери мощности при протекании токов высших гармоник [7]:

$$\Delta P_v = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_{k1} k_{vm}, \quad (1)$$

где  $I_v$  — ток  $v$ -й гармоники, проходящей через трансформатор;  $R_{k1}$  — сопротивление короткого замыкания трансформатора при частоте 50 Гц;  $k_{vm}$  — коэффициент увеличения сопротивления при коротком замыкании для высших гармоник.

Кроме того, на частотах высших гармоник возникают потери, вызываемые вихревыми токами,

$$\Delta P_{0v} = 0,05 \Delta P_v v^2. \quad (2)$$

Таким образом, полные дополнительные потери, возникающие из-за протекания токов высших гармоник, составляют

$$\Delta P_{\text{полн } v} = \sum_{v=2}^n \Delta P_v (1 + 0,05v^2). \quad (3)$$

Полные потери мощности, выделяемые в тепло, обусловленные токами высших гармоник на основной частоте составляют

$$\Delta P_{\text{сумм}} = \Delta P_1 + \Delta P_{\text{полн } v}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_1$  — потери тепловой мощности на основной частоте трансформатора.

Из изложенного следует, что температура  $\theta_{\text{ТО}}$ , превышающая номинальную температуру обмотки низкого напряжения трансформатора  $\theta_{\text{ном ТО}}$ , будет зависеть от степени суммарных активных потерь мощности трансформатора

$$\theta_{\text{ТО}} \equiv \Delta P^n, \quad (5)$$

где  $\Delta P$  — суммарные потери мощности в трансформаторе;  $n$  — показатель степени.

Номинальное превышение температуры для трансформаторов типа ТМ, в соответствии с ГОСТ 11677-85, должно составлять  $\theta_{\text{ном ТО}} \leq 60$  °С.

Также соотношение температуры масла  $\theta_{\text{Н}}$  для масляных трансформаторов, превышающая температуру охлаждающей среды  $\theta_{\text{ном Н}}$ , будет выглядеть следующим образом

$$\theta_{\text{Н}} \equiv \Delta P^m,$$

где  $m$  — показатель степени.

Превышение температуры, в соответствии с ГОСТ 11677-85, должно составлять  $\theta_{\text{ном Н}} \leq 75$  °С.

Дополнительный нагрев обмотки трансформатора в несинусоидальном режиме  $\Delta\tau$  можно определить следующим образом [8]:

$$\Delta\tau = A \left( \frac{(0,01k_{2U})}{U_k^2} + \frac{1,291}{U_k^2} \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}} k_{U(v)}^2 \right), \quad (6)$$

где  $A = \frac{m\theta_{\text{Н}}P_{\text{КЗ}}}{P_{\text{КЗ}} + P_{\text{ХХ}}} + n\theta_{\text{ТО}}$  — постоянная, зависящая от конструктивных, магнитных и электромагнитных параметров трансформатора;  $k_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}}$  — коэффициент обратной последовательности напряжений, равный отношению напряжения обратной последовательности  $U_2$  к номинальному напряжению  $U_{\text{ном}}$ ;  $k_{U(v)} = \frac{U_v}{U_{\text{ном}}}$  — относительное значение напряжения  $v$ -й гармоники;  $U_k$  — напряжение короткого замыкания;  $P_{\text{КЗ}}$  — потеря мощности при коротком замыкании;  $P_{\text{ХХ}}$  — потеря мощности холостого хода;  $m$  и  $n$  — параметры, характеризующие нелинейность и используемые для определения зависимости превышения температуры верхних слоев масла над температурой охлаждающей среды и зависимости превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой верхних слоев масла (в соответствии с ГОСТ 14209-97).

Для анализа надёжности трансформаторов типа ТМ при влиянии токов высших гармоник может быть принят нормальный закон распределения времени безотказной работы. Тогда функция надёжности будет иметь вид [8]

$$R(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-m_V}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{m_V}{\sigma_V}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx} = \frac{0,5 + \Phi\left(\frac{m_V - t}{\sigma_V}\right)}{0,5 + \Phi\left(\frac{m_V}{\sigma_V}\right)}, \quad (7)$$

где  $m_V = Be^{-\alpha m_{\Delta t} + \frac{\alpha^2}{2} \sigma_{\Delta t}^2}$  — математическое ожидание срока службы трансформатора;  
 $\sigma_V = m_V \sqrt{e^{\alpha^2 \sigma_{\Delta t}^2 - 1}}$  — среднее квадратичное отклонение срока службы трансформатора;  $\sigma_{\Delta t}$  — среднее квадратичное отклонение дополнительного нагрева трансформатора;  $m_{\Delta t}$  — математическое ожидание дополнительного нагрева трансформатора;  $B$  — постоянная срока службы трансформатора, зависящая от условий окружающей среды;  $\alpha = 0,1155 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  — известный коэффициент старения изоляции для трансформаторов;  $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  — интеграл вероятностей.

Все выражения получены при допущении нормального закона распределения температуры  $\Delta t$ .

Из изложенного следует, что при расчёте показателей надёжности для трансформаторов типа ТМ, применяемых в порту, необходимо пользоваться такими данными как: тепловые потери при коротком замыкании  $\Delta P_{\text{КЗ}}$ , потери холостого хода  $\Delta P_{\text{ХХ}}$ , напряжение короткого замыкания  $U_{\text{КЗ}}$ , номинальный ток  $I_{\text{ном}}$  и номинальное напряжение трансформатора  $U_{\text{ном}}$ , коэффициент несинусоидальности напряжения для  $v$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_1}$ .

Расчёты функции надёжности  $R(t)$  для трансформатора типа ТМ-360/10, представленный в таблице, показал, что существенное снижение надёжности будет наблюдаться при увеличении коэффициента несинусоидальности. Даже если нагрузка трансформатора ТМ не превышает номинальную, влияние несинусоидальности напряжения будет проявляться всё больше [9].

**Величина  $R(t)$  для разных значений  $K_U$**

Коэффициент несинусоидальности $K_U$ , %	7,38	8	8,307	8,66	8,92
Функция надёжности $R(t)$	0,942	0,836	0,712	0,458	0,245

Проведённые в трёх населенных пунктах Камчатки наблюдения (Петропавловск-Камчатский, Паратунка, Усть-Большерецк) показали, что только в Усть-Большерецке коэффициент несинусоидальности меньше максимального из таблицы. Следовательно, с учётом дальнейшего насыщения сетей нелинейными потребителями, проблема ГИТ становится всё более актуальной. К сожалению, в России до настоящего времени отсутствуют рекомендации по повышению надёжности функционирования систем электроснабжения при геомагнитных бурях, как, например, в документе С-15 «Действия при солнечных магнитных возмущениях, влияющих на электроэнергетические системы» [10], разработанном Координационным советом северо-восточной электроэнергетической системы США после геомагнитной бури 1989 г.

### Выводы

Для повышения надёжности энергоснабжения порта Петропавловск-Камчатский необходимо принятие мер по предотвращению деструктивного проявления ГИТ, которые можно разделить на превентивные, закладываемые при проектировании энергетических систем, и ситуативные, принимающиеся исходя из геофизической обстановки.

В качестве превентивных мер можно использовать рекомендации Европейского комитета по стандартизации (European committee for electrotechnical standardization), заключающиеся в выборе мощности трансформатора с учётом уровня высших гармоник.

В качестве ситуативных мер можно использовать, например, оперативные переключения нагрузки, исходя из сочетания складывающейся геофизической обстановки и уровня высших гармоник, информацию о которой можно получить из предложенного подхода. В отличие от используемых в мировой практике способов мониторинга ГИТ, наш подход основан на применении более доступного и простого оборудования, включение которого возможно непосредственно у потребителя.

### Список литературы

1. Железкова П. Е. Грузооборот портов Северо-Западного региона России на Балтийском море / П. Е. Железкова, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 133–138.
2. Elias A. G. Strong geomagnetic disturbances and induced currents on earth surface / A. G. Elias, V. M. Silberglei // Progress in electromagnetics research letter. — 2008. — Vol. 1. — Pp. 139–148.
3. Скопинцев В. А. Влияние космических факторов на повреждаемость в электрических сетях / В. А. Скопинцев, Д. В. Маркитанов // Энергетик. — 2012. — № 10. — С. 8–11.
4. Сивоконь В. П. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов / В. П. Сивоконь, А. С. Сероветников, А. В. Писарев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2011. — № 3. — С. 44–51.
5. Сивоконь В. П. Геомагнитно-индуцированные токи в электрических сетях Камчатки / В. П. Сивоконь, А. С. Сероветников // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2013. — № 3. — С. 19–22.
6. Сероветников А. С. Вариации спектра тока трансформатора, подверженного воздействию геомагнитно-индуцированных токов / А. С. Сероветников, В. П. Сивоконь // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2015. — № 1. — С. 18–21.
7. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер, А. Г. Лютаевич, В. Н. Горюнови [др.] // Омский научный вестник. — 2013. — № 2 (120). — С. 178–183.
8. Черепанов А. В. Управление качеством электроэнергии и энергоэффективностью в системах электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / А. В. Черепанов. — Иркутский гос. ун-т путей сообщения. — Иркутск, 2015.
9. Жежеленко И. В. Расчёт надёжности силовых трансформаторов при наличии несинусоидальности и несимметрии напряжений / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. — 2004. — № 14. — С. 255–260.
10. Document C-15 «Procedures for Solar Magnetic Disturbances which Affect Electric Power Systems» revised January 11 2007: Northeast Power Coordination Council, New York, NY.