**О влиянии солнечных бурь на силовые трансформаторы**

**ГУРЕВИЧ В. И., канд. техн. наук**

**Центральная лаборатория Электрической компании Израиля**

**Израиль, 31000, г. Хайфа, п/я 10**

**vladimir.gurevich@gmx.net**

Рассмотрена проблема влияния геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), возника­ющих при солнечных бурях, на силовые трансформаторы. Проанализированы мно­гочисленные литературные источники, в которых представлены данные по значени­ям ГИТ в силовых трансформаторах в южных широтах Земного шара. Показано, что несмотря на ряд публикаций, призывающих к пересмотру сложившихся тради­ционных взглядов на опасность ГИТ, согласно которым проблема насыщения транс­форматоров ГИТ существует лишь для северных широт, в настоящее время нет ни­каких экспериментально подтверждённых данных о необходимости пересмотра традиционных взглядов на проблему. Не следует считать опасными уровни ГИТ для силовых трансформаторов, находящихся в Южном полушарии.

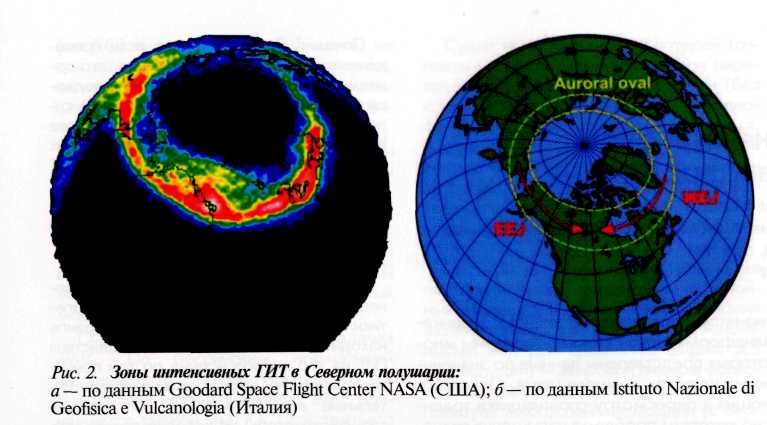
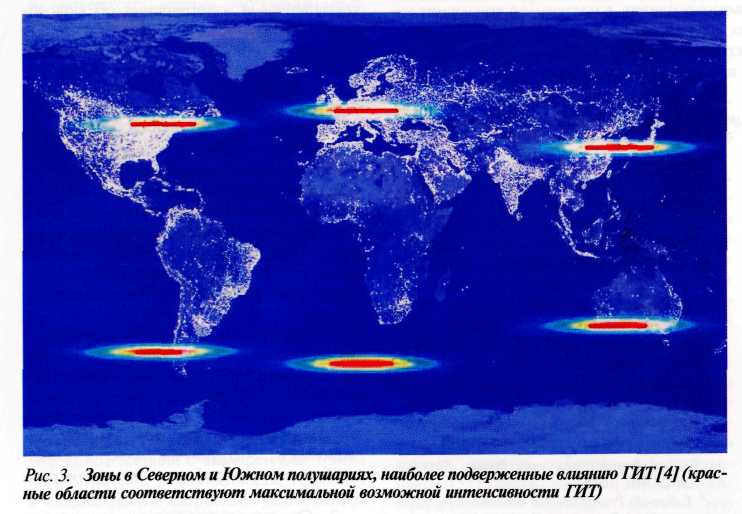
Проблема повреждения мощных силовых трансформаторов ГИТ во время солнечных бурь хорошо известна [1, 2]. Квазипостоянные токи ГИТ, протекающие через заземлённые нейтрали силовых трансформаторов в регионах, которые расположены в северных широтах, могут достигать 100 - 300 А. Под их действием происходит глубокое насыщение магнитопроводов трансформаторов, снижение импеданса, перегрев обмоток и магнитопровода вплоть до перегорания первых.

Хорошо известны случаи коллапса энергосистемы HydroQuebec в Канаде, когда 6 млн чел. в течение 9 ч оставались без электроэнергии, а также перегорания мощного силового трансформатора компании Public Service Electric and Gas Company в Нью-Джерси на Северо-Востоке США во время солнечной бури в марте 1989 г. (рис. 1) [3].



В северной части Финляндии во время солнечных бурь в 2005 и 2012 гг. зафиксированы ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов с амплитудой до 200 А, в Швеции в 2000 г. — ГИТ с амплитудой около 300 А. В августе 2003 г. в результате воздействия ГИТ на трансформаторы произошёл коллапс энергосистем в северной части США и пограничной части Канады.

До недавнего времени все зафиксированные повреждения силовых трансформаторов происходили в регионах, расположенных в приполярных областях северных широт, (рис. 2). В публикации [4] дополнительно выделены зоны и в Южном полушарии, интенсивность ГИТ в которых намного ниже, чем в северных, но, тем не менее они имеют боль-шее значение, чем в других, не выделенных областях (рис. 3).

Таким образом, до недавнего времени во всем мире считалось, что только близкие к полюсам регионы подвержены существенному влиянию ГИТ. Однако в 2007 г. выходит сенсационная статья двух авторов из Кейптаунского университета ЮАР под названием «Риск повреж­дения трансформаторов в регионе от воздействия ГИТ считается низким неправильно» [5]. Она сразу же привлекла вни­мание исследователей во многих странах мира. Её цитируют в десятках статей дру­гих авторов, на неё ссылаются даже в официальных отчётах.

Почему? Да потому, что если приве­дённые в ней данные корректны, это оз­начает изменение существующих подхо­да и взглядов на ГИТ и его влияние на си­ловые трансформаторы. Ведь на широте ЮАР расположено множество других стран, для которых ранее опасность ГИТ не принималась в расчёт. Более того, вы­воды, полученные в этой статье, распро­страняются некоторыми авторами на многие другие регионы, включая Ближ­ний Восток.

Например, в одном из отчётов, выполненных по заказу Министерства энерге­тики Израиля, утверждается, что Израиль находится в зоне опасного воздействия ГИТ на его энергосистему по той причи­не, что в ЮАР зафиксированы разруши­тельные воздействия ГИТ на силовые трансформаторы. И вот уже появляются спекулятивные утверждения об опасно­сти ГИТ в России.

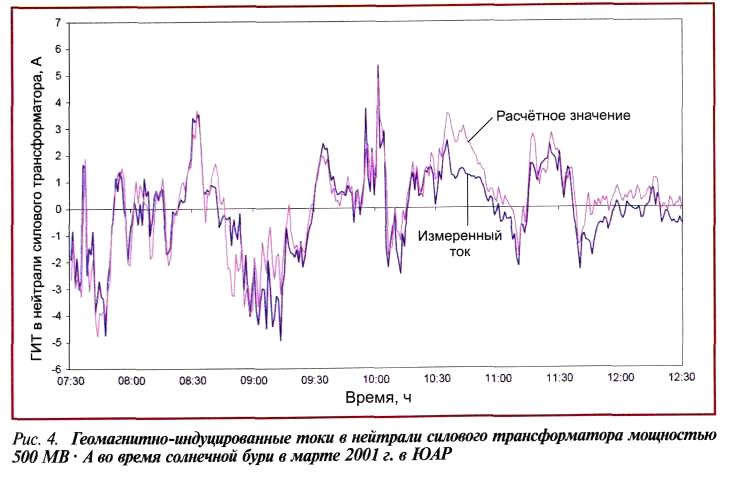
Одна из четырёх статей, опубликованных в 2013 г. с претензией на сенсацию, так и называется «Геомагнитные штор­мы. Угроза национальной безопасности России» [6] и это при том, что никаких реально зафиксированных результатов измерений, подтверждающих тезис об опасности высоких значений ГИТ в России в этих статьях не представлены.

Какие же аргументы используют авторы из Кейптаунского университета в до­казательство своего сенсационного заявления? Рассмотрим поэтапно основные положения этой статьи.

1. Приводятся ссылки на несколько опубликованных ранее работ, в которых делается вывод, что основная причина выхода из строя старых крупных трансформаторов в ЮАР — повреждение внутренней изоляции. При этом авторы подчёркивают, что данный факт в ранее опубликованных работах никогда не рассматривался.

Отмечаются известные случаи коллапса энергосистемы Hydro-Quebec в Канаде и повреждение силового трансфор­матора на атомной станции в штате Нью-Джерси на Северо-Востоке США в ре­зультате воздействия ГИТ (где Канада, и где Южная Африка!)

1. Упоминается диссертационная работа одного из авторов статьи J. Коеп, в которой известная методика расчёта ГИТ применена к энергосистеме ЮАР и показано, что она хорошо согласуется с экспериментальными измерениями ГИТ в силовых трансформаторах. Рис. 4 свидетельствует, что максимальная амплитуда реально измеренных ГИТ в мощном силовом трансформаторе не превышает 6 А, причём протекают они в течение очень короткого промежутка времени.



1. Между ссылками на различные работы других авторов утверждается, что зафиксированы неоднократные случаи насыщения трёхфазных трёхстержневых трансформаторов (известных, кстати, как значительно более устойчивых к ГИТ, чем однофазные или пятистержневые трёхфазные трансформаторы) токами ГИТ значением 2 А. Кем и где именно это зафиксировано в статье не сообщается.

5. Далее в разделе «Термические по­вреждения токами ГИТ в ноябре 2003» представлены фотографии трансформаторов со сгоревшими обмотками (рис. 5), которые очень напоминают по­вреждения силового трансформатора в Нью-Джерси, ГИТ в которых составляли сотни ампер, а также отмечается повышенное содержание растворённых в масле газов. При этом указано, что данные газы образовались после не­скольких геомагнитных бурь, а некоторые трансформаторы аварийно отключались через много месяцев после зафик­сированных указанных явлений.

Следует отметить, что несмотря на постоянный мониторинг ГИТ, в статье не приведены данные об их реальных значе­ниях, зафиксированных именно в этих трансформаторах (см. рис. 5).

6. В разделе «Другие возможные причины повреждения» упоминается, что повреждения трансформаторов от ГИТ не обязательно должны происходить во время геомагнитных бурь. Они могут появиться и через год после воздействия ГИТ вследствие полученных стрессов. При этом такие выводы ничем не подтверждены и не обоснованы.

Таким образом, можно утверждать, что единственный экспериментально подтверждённый факт — возникновение ГИТ с амплитудой до 6 А в силовых трансформаторах в энергосистеме ЮАР. Все остальные данные приводятся в статье на уровне рассуждений и предположений без реальных результатов измерений.



Рассмотрим теперь, насколько опасен для крупных силовых трансформаторов ГИТ, с амплитудой до 6 А. Для этого обратимся к новому стандарту IEEE [7], в котором обобщён накопленный опыт в области влияния ГИТ на силовые трансформаторы. В стандарте рассмотрены многочисленные аспекты, ослабляющие или усиливающие степень влияния ГИТ, в том числе конструктивные особенности трансформаторов, степень их загрузки и пр., однако ГИТ менее 10 А вообще не упоминаются вследствие их совершенно незначительного влияния на трансфор­маторы. А в разделе 6.5 данного стан­дарта прямо указано, что повышение температуры обмоток и других кон­структивных элементов в силовых транс­форматорах при токах ГИТ 10 А пренебрежимо мало.

Обратимся к другим публикациям, где рассматриваются причины повреждений в энергосистеме ЮАР. Стоит выделить весьма обстоятельный отчёт [8], содер­жащий анализ более 12 тыс. случаев ава­рий, происшедших за 16 лет (период 1993 - 2009 гг.). В это время 2003 -- 2004 гг. (по утверждению авторов пре­дыдущей статьи [5]) произошло массовое повреждение силовых трансформаторов из-за воздействия геомагнитной бури.

Указанный анализ основан, например, на данных, предоставленных компанией Advanced Fire Information System, исполь­зующей специальное регистрирующее оборудование, установленное на спутни­ках NASA и другими фирмами. Статисти­ка причин повреждений распределяется следующим образом: 38 % всех по­вреждений вызвано крупными птицами, 26 % — молниями, 22 % — возгорания­ми силового электрооборудования.

К другим причинам отнесены случаи вандализма, низкой квалификации персо­нала, падения деревьев и пр. Причём, среди более чем 12 тыс. повреждений даже не упоминаются нарушения элек­троснабжения, вызванные геомагнитны­ми бурями. И это при том, что один из авторов данной публикации — С. Т. Gaunt, который пять лет назад был соавтором той самой сенсационной ста­тьи, в которой утверждалось, что ЮАР находится в зоне опасного воздействия ГИТ на энергосистему. Что изменило взгляды этого автора за пять лет остаётся загадкой.

А что пишут другие авторы об энерго­системе ЮАР?

В обзоре [9] приведены результаты анализа повреждений 188 силовых трансформаторов напряжением от 88 до 765 кВ мощностью 20 - 800 MB. А в течение пяти лет. Более 80 % силовых трансформаторов имеют мощность до 400 MB А. В конце [9] делается вывод о том, что для этой группы трансформаторов наиболее часты повреждения, вы­званные старением изоляции. Что касает­ся повреждений, вызванных ГИТ, то о них даже не упоминается.

В отчёте организации Mitigation Action Plans & Scenarios (MAPS), подготовлен­ном для Министерства энергетики ЮАР

отмечается кризисное состояние элек­троэнергетики в ЮАР из-за отсутствия вложений средств в развитие в течение последних 20 лет.

После внимательного рассмотрения доводов, приведённых в упомянутой сен­сационной статье и знакомства с резуль­татами анализа повреждений трансфор­маторов в ЮАР, выполненных многочисленными авторами, возникает сомнение в состоятельности приведённых утверждений и подозрение в попытке искус­ственного отвлечения от реальных про­блем электроэнергетики.

А как обстоят дела в странах, находящихся примерно на тех же широтах, что и ЮАР?

Влияние ГИТ на силовые трансформа­торы в Южной Австралии подробно проанализировано в [10]. Реальные изме­рения ГИТ в силовых трансформаторах во время геомагнитных бурь дают значения, не превышающие 4-5 А, т. е. очень близкие к значениям, полученным в ЮАР, хотя авторы публикации и отме­чают, что ожидаемые ГИТ во время дру­гих геомагнитных бурь теоретически мо­гут быть и больше.

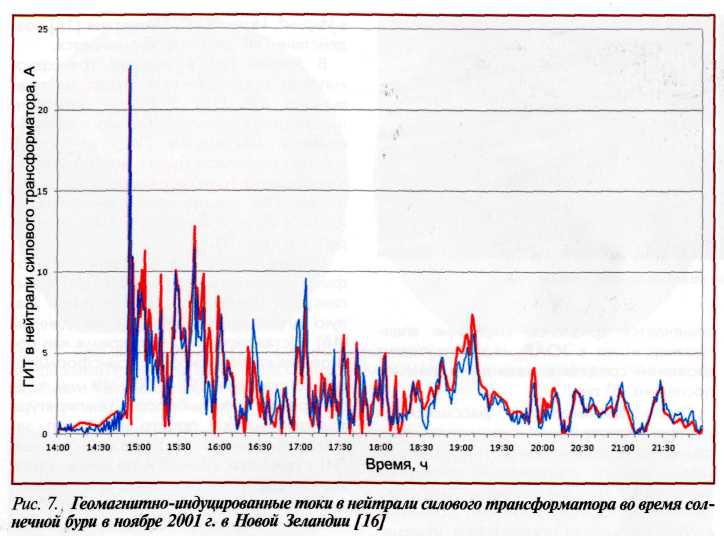
По трансформаторам в энергосистеме Уругвая [11] экспериментальных данных нет. Теоретические вычисления дают результаты, схожие с данными по Южной Африке. В южной части Бразилии [12] экспериментально определены ГИТ в силовых трансформаторах за период 2009 - 2013 гг. очень близкие по своим значениям к токам, зафиксированным в ЮАР (рис. 6). При анализе причин по­вреждений силовых трансформаторов в Индии, Иране [13], Пакистане [14] воз­действие ГИТ даже не упоминается.

В Японии ГИТ в силовых трансфор­маторах при солнечных бурях не превышают 4 А [15]. В Новой Зеландии, находящейся довольно близко к области южного максимума ГИТ, во время сильной солнечной бури в ноябре 2001 г. в нескольких трансформаторах зафикси­рованы ГИТ с амплитудой, не превыша­ющей 6 А, а в некоторых ГИТ доходил до 22 А (рис. 7).

Обращает на себя внимание тот факт, что отдельные выбросы ГИТ с ам­плитудой более 10 А имеют очень ма­лую длительность, которая по данным [16] составляет 20 с, в то время как по­стоянная нагрева силовых трансформато­ров по стандарту [9] — 30 -ь 45 мин, т. е. за время этих выбросов температура трансформатора просто не успеет за­метно измениться. Но даже и длительные ГИТ в пределах 20 - 30 А по данным того же стандарта недостаточны для повреж­дения силовых трансформаторов.

Таким образом, во всех перечис­ленных регионах мира, расположенных в Южном полушарии, возникающие во время солнечных бурь ГИТ не достигают значений, способных повредить силовые трансформаторы. А как же узнать, каких именно значений они до­стигают?



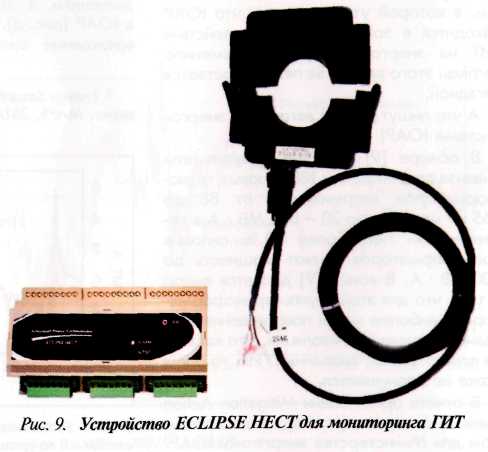


Для ответа на этот вопрос суще­ствуют два метода: расчётный, осно­ванный на специальном программном модуле, и экспериментальный посред­ством измерения ГИТ в цепях заземления нейтралей силовых трансформаторов. Можно использовать и комбинацию этих методов.

Специальный программный модуль PSS®E разработан компанией Siemens5. В качестве исходных данных для расчёта ГИТ в программе используются данные о географическом расположении под­станций и линий электропередачи, сопро­тивлении системы заземления, свойстве грунтов, сопротивлении и группе соединений трансформаторов, конструкции магнитной системы трансформаторов.

Для непосредственного измерения ГИТ компанией Dynamic Ratings выпускается простой датчик тока GIC-46, выполненный в виде трансформатора тока с разъёмным сердечником, который одевается на провод, соединяющий нейтраль трансформатора с системой заземления (рис. 8). Этот датчик работает на эле­менте Холла и содержит специальный фильтр, блокирующий токи с частотой выше 3 Гц. Датчики выпускаются на два диапазона максимальных входных токов: до 45 А и до 360 А. Они имеют стандартный выходной сигнал 4 — 20 мА, позво­ляющий использовать их в любой системе регистрации и мониторинга, а также передавать сигнал на удалённый диспетчер­ский пункт.

Компания Advanced Power Technologies производит более совершенное устройство ECLIPSE HECT, которое в до­полнение к измерению постоянной со­ставляющей тока в нейтрали трансформатора определяет также и уровень гармоник в токе трансформатора, появ­ляющихся вследствие насыщения сердечника трансформатора ГИТ (рис. 9).

Помимо собственно датчика ГИТ в нейтрали силового трансформатора, указанное устройство имеет небольшой из­мерительный модуль и два небольших трансформатора тока. Последние включаются во вторичные цепи стандартных трансформаторов тока, расположенных в проходных изоляторах силовых транс форматоров и служат для анализа гар­монического состава токов, вплоть до 7-й гармоники. Измерительный модуль ис­пользуется для преобразования входных сигналов в стандартный 4 — 20 мА, а так­же настройки на выдачу тревожного сиг­нала при превышении ГИТ или уровнем гармоник заданного порога.

*Выводы*

1. Из проведённого анализа ситуации следует, что в настоящее время нет никаких экспериментальных данных, подтверждающих повреждения силовых трансформаторов геомагнитно-индуцированными токами во время солнечных бурь в ЮАР, странах, находящихся на широте ЮАР, в Ближневосточном регионе, России, Индии и многих других странах.
2. В настоящее время нет экспериментально подтверждённых данных, из которых следовала бы необходимость пересмотра ранее установленных общепризнанных зон с повышенным уровнем ГИТ, представляющим опасность для силовых трансформаторов.
3. Распространённые во многих документах ссылки на повреждения силовых трансформаторов во время солнечных бурь, якобы имевших место в ЮАР, на самом деле несостоятельны и не должны приниматься во внимание при рассмотрении вопроса о необходимости принятия специальных мер по защите силовых трансформаторов в том или ином регионе.
4. В целях оценки реальной опасности ГИТ в определённом регионе для конкретных силовых трансформаторов можно использовать расчётный метод, предложенный компанией Siemens, или специальные датчики, непосредственно измеряющие ГИТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурввич В. И.* Силовые трансфор­маторы тоже подвержены влиянию Солн­ца // Электротехнический рынок. 2011. № 5. С. 48-51.

1. *Гуревич В. И.* Проблема геомагнитно-индуцированных токов в энергосистемах и её решение // Энергетика и электрооборудование. 2015. № 3. С. 20 – 23 и № 4. С. 30 - 32.
2. *Marusek J. A.* Solar Storm Threat Analysis // Impact, 2007. Bloomfield, Indiana *47424.*
3. *Geomagnetically* induced currents in the New Zealand power network / Marshall R. A., Dalzell M., Waters С L. et al. // Space Weather. 2012. V. 10. Issue 8.
4. *Gaunt С. Т., Coetzee G.* Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC risk. Mat Post 07, 3rd European Conference on MV & HV Substation Equipment. Nov 15 - 17, 2007. Lyon, France // Proceedings of Power Tech, July 15, 2007, Lausanne, Switzerland.
5. *Сушко В. А., Косых Д. А.* Геомагнитные штормы. Угроза национальной безопасности России // Новости электротехники. 2013. № 4.
6. *IEEE Std.C57.163-2015:* IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances. 2015.
7. *Minnaar U. J., Gaunt С. Т., Nicolls F.* Characterisation of power system events on South African transmission power lines // Electric Power System Research, 2012. V. 82. Issue 1. P. 25 - 32.
8. *Minhas M. S, A., Reynders J. P., De Klerk P. J.* Failures in power system transformers and appropriate monitoring techniques. — High Voltage Engineering Symposium, *22 - 27* August 1999, Conference Publication No. 467, IEEE, 1999. V. 1. London.
9. *Observations* of Geomagnetically Induced Currents in the Australian Power Network / Marshall R. A., Gorniak H., Van Der Walt T. et al. — Space Weather, Jan. 2013. V. 11. Issue 1. P. 6- 16.
10. *Caraballo R., Sanchez Bettucci L, Tancredi G.* Geomagnetically induced currents in the Uruguayan high-voltage power grid // Geophysical Journal International.

2013. August 16.

1. *Analysis* of geomagnetically induced currents at a low-latitude region over the solar cycles 23 and *24:* comparison between  
   measurements and calculations / С Barbosa, L. Alves, R. Caraballo et al. // J. Space Weather Space Clim. 2015. 5. A35.
2. *Mirza M., Gholami A., Aminifar F.* Failures Analysis and Reliability Calculation for Power Transformers // Journal of Electrical Systems. 2006. No. 1 - 2. P. 1 - 12.
3. *JanS. Т., AfzalR., Khan A. Z.* Transformer Failures, Causes & Impact. — International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering (ICDMCME'2015) Feb. 1 - 2, 2015 Bali (Indonesia), P. 49 -52.
4. *Effects* of Geomagnetically Induced Current on Power Grids / W. Shinichi, K. Manabu, K. Kentarou et al. // Journal of the National Institute of Information and  
   Communications Technology. 2009. V. 56. No. 1 -4. P. 125- 133.
5. *How severe* space weather can disrupt global supply chains / H. Schulte in den Baumen, D. Moran, M. Lenzen et al. //Natural Hazards and Earth System Sciences.

2014. V. 14. Issue 10. P. 2749 - 2759.