

В статье рассматривается степень опасности геомагнитных бурь в средних широтах для силовых трансформаторов, а также необходимость принятия мер по предотвращению ложного срабатывания релейной защиты во время таких бурь.

«Солнечный удар» по силовым трансформаторам

Владимир Гуревич, канд. техн. наук, г. Хайфа

Проблема повреждения мощных силовых трансформаторов геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ) во время солнечных бурь, хорошо известна [1]. Квазипостоянные токи ГИТ, протекающие через заземленные нейтрали силовых трансформаторов в регионах, расположенных в северных ши-



Рис.1

ротах, могут достигать 100-300 А. Под действием таких токов происходит глубокое насыщение магнитопроводов трансформаторов, снижение импеданса и перегрев обмоток и магнитопровода вплоть до перегорания обмоток.

Зафиксированные случаи повреждения силовых трансформаторов ГИТ

Хорошо известен случай коллапса энергосистемы Hydro-Quebec в Канаде, когда 6 миллионов человек в течение 9 часов были без электроэнергии, а также перегорание 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.

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

До недавнего времени все зафиксированные случаи повреждений силовых трансформаторов происходили в регионах, расположенных в приполярных областях в северных широтах. На рис.2 показаны зоны интенсивных ГИТ в Северном полушарии. Слева - по данным Goodard Space Flight Center NASA (США), справа - по данным Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Италия).

В публикации [2] дополнительно выделены зоны и в южном полушарии, интенсивность ГИТ в которых намного ниже, чем в северных, но, тем не менее, они имеют большее значение, чем в других, не выделенных областях.

Зоны в Северном и Южном полушарии, наиболее подверженные влиянию ГИТ (по данным [2], показаны на рис.3. Красные области соответствуют максимальной возможной интенсивности ГИТ для соответствующего полушария.

Возможность повреждения трансформаторов ГИТ в средних широтах

До недавнего времени во всем мире считалось, что только регионы, близкие к полюсам могут быть подвержены существенному влиянию геомагнитно-индуцированных токов. Но в 2007 г. выходит сенсационная статья двух авторов из Кейп-

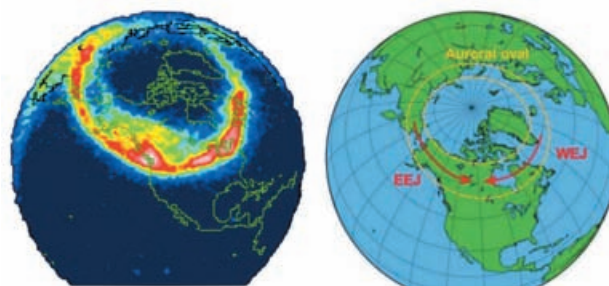


Рис.2

таунского университета ЮАР под названием «Риск повреждения трансформаторов в регионе от воздействия ГИТ считается низким неправильно» [3]. Эта статья сразу же привлекла внимание исследователей во многих странах мира. Ее цитируют в десятках статей других авторов, на нее ссылаются даже в официальных отчетах. Почему? Да потому, что если приведенные в ней данные корректны, то это озна-

чает изменение существующего подхода и существующих взглядов на ГИТ и его влияние на силовые трансформаторы. Ведь на широте Южно-Африканской республики расположено множество других стран, для которых ранее опасность ГИТ ранее не принималась в расчет. Более того, выводы, полученные в этой статье, распространяются некоторыми авторами на многие другие регионы, включая Ближний Восток. Например, в одном из отчетов, выполненных по заказу Министерства энергетики Израиля, утверждается, что Израиль находится в зоне опасного воздействия ГИТ на его энергосистему по той причине, что в ЮАР зафиксировано разрушительные воздействия ГИТ на силовые трансформаторы. И вот уже появляются спекулятивные утверждения об

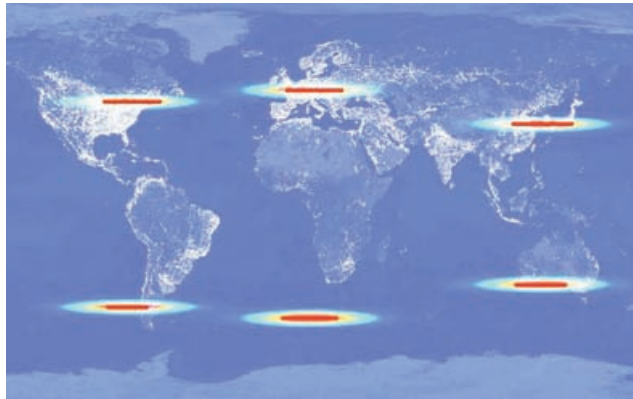


Рис.3

опасности ГИТ в России. Одна из четырех статей, опубликованных в 2013 г. в журнале «Новости электротехники» с претензией на сенсацию так и называется: «Геомагнитные штормы. Угроза национальной безопасности России» [4] и это при том, что никаких реально зафиксированных результатов измерений, подтверждающих тезис об опасности высоких значений ГИТ в России в этих статьях не приводится.

Доводы исследователей из ЮАР

Какие же аргументы приводят авторы из Кейптаунского университета в доказательство своего сенсационного заявления? Рассмотрим поэтапно основные положения этой статьи в той последовательности, которой пользуются сами авторы.

1. Приводятся ссылки на несколько опубликованных ранее работ, в которых делается вывод о том, что основным видом повреждений старых крупных трансформаторов в ЮАР являются повреждения внутренней изоляции. При этом авторы статьи особо подчеркивают, что ни в одной из ранее опубликованных работ ГИТ не рассматривался как причина повреждения силовых трансформаторов в энергосистеме ЮАР.

2. Приводятся ссылки на 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!)

3. Приводится ссылка на диссертационную работу одного из авторов статьи Коен, J., в которой автор применил из-

вестную методику расчета ГИТ к энергосистеме ЮАР и показал, что она хорошо согласуется с экспериментальными замерами ГИТ в силовых трансформаторах. Токи ГИТ, в нейтрали силового трансформатора мощностью 500 МВА во время солнечной бури в марте 2001 г. в ЮАР показаны на рис.4.

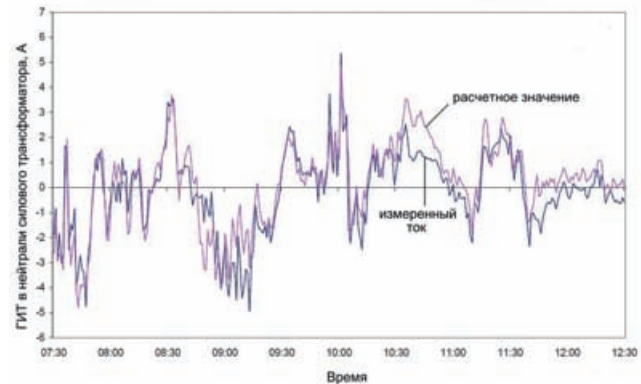


Рис.4

При этом, из рис.4 хорошо видно, что максимальная амплитуда реально измеренных значений ГИТ в мощном силовом трансформаторе не превышает 6 А, причем протекающих в течение очень короткого промежутка времени.

4. Между ссылками на различные работы других авторов, утверждается, что были зафиксированы неоднократные случаи насыщения трехфазных трехстержневых трансформаторов (известных, кстати, как значительно более устойчивых к ГИТ, чем однофазные или пятистержневые трехфазные трансформаторы) токами ГИТ величиной 2 А. Кем именно они были зафиксированы и где именно, в статье [3] не сообщается.

5. Далее, в разделе под названием «Термические повреждения токами ГИТ в ноябре 2003» приводятся фотографии



Рис.5

трансформаторов со сгоревшими обмотками (рис.5), которые очень напоминают повреждения силового трансформатора в Нью-Джерси, токи ГИТ в которых составляли сотни ампер, а также отмечается повышенное содержание растворенных в масле газов.

При этом отмечается, что эти газы образовались **после нескольких геомагнитных бурь**, а некоторые трансформаторы **аварийно отключались через много месяцев после зафиксированных геомагнитных бурь**. Обращает на себя внимание тот факт, что, несмотря на постоянный мониторинг ГИТ, в статье не приведено никаких данных о реальных токах ГИТ, зафиксированных именно в этих трансформаторах, вызвавших такие серьезные повреждения этих конкретных трансформаторов, фото которых представлены на рис.5.

6. В разделе «Другие возможные причины повреждения» отмечается, что повреждения трансформаторов от токов 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 в статье ничем не подтверждены и не обоснованы.

Опасность токов ГИТ для трансформаторов

Таким образом, можно утверждать, что единственным экспериментально подтвержденным фактом является случай возникновения ГИТ с амплитудой до 6 А в силовых трансформаторах в энергосистеме ЮАР, все остальные данные приводятся в статье на уровне рассуждений и предположений, не подтвержденных реально зафиксированными результатами измерений.

Посмотрим, теперь насколько опасным для крупных силовых трансформаторов является ГИТ с амплитудой до 6 А.

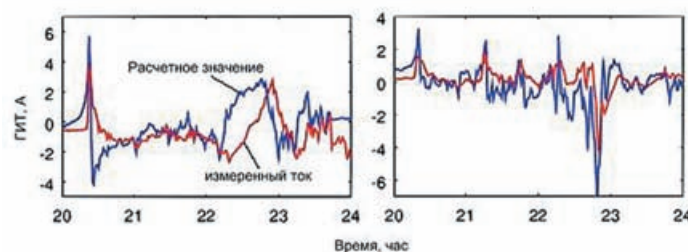


Рис.6

Для этого обратимся к новому стандарту IEEE [5], в котором обобщен накопленный на сегодняшний день опыт в области влияния ГИТ на силовые трансформаторы. В этом стандарте рассмотрены многочисленные аспекты, ослабляющие или усиливающие степень влияния ГИТ, включая конструктивные особенности трансформаторов, степень их загрузки и т.п. Так вот, в этом стандарте токи ГИТ менее чем 10 А вообще не рассматриваются и не упоминаются вследствие их совершенно незначительного влияния на трансформаторы. А в разделе 6.5 этого стандарта прямо указывается, что повышение температуры обмоток и других конструктивных элементов в силовых трансформаторах при токах ГИТ 10 А пренебрежимо мало.

Обратимся к другим публикациям, рассматривающим причины повреждений в энергосистеме ЮАР. Среди многочисленных публикаций на эту тему стоит выделить очень обстоятельный отчет [6], содержащий анализ 12.229 случаев аварий в энергосистеме ЮАР, происшедших за период в 16 лет (с 1993 до конца 2009 г.), то есть включающий период 2003-2004 годов в котором, по утверждению авторов предыдущей статьи, произошло массовое повреждение силовых трансформаторов из-за воздействия геомагнитной бури. Этот анализ основан на данных предоставленных авторам такими солидными организациями, как Advanced Fire Information System, использующей специальное регистрирующее оборудование, установленное на спутниках NASA и на данных других организаций. Статистика причин повреждений распределяется следующим образом: 38% всех повреждений вызвано крупными птицами, 26% молниями, 22% возгораниями сило-

вого электрооборудования. К другим причинам отнесены случаи вандализма, низкой квалификации персонала, падений деревьев и т.п. Причем, среди более чем 12 тысяч случаев повреждений даже не упоминаются случаи нарушения электроснабжения, вызванные геомагнитными бурями. И это притом, что одним из авторов этой публикации является С. Т Gaunt, который за пять лет до этого был соавтором той самой сенсационной статьи о том, что ЮАР находится в зоне опасного воздействия ГИТ на энергосистему. Что произошло с взглядами этого автора за пять лет остается загадкой.

А что пишут другие авторы об энергосистеме ЮАР?

В обзоре [7] приведены результаты анализа повреждений 188 силовых трансформаторов с напряжением от 88 до 765 кВ мощностью от 20 до 800 МВА в течение 5 лет. Более 80% силовых трансформаторов имеют мощность до 400 МВА. В статье делается вывод о том, что для этой группы трансформаторов наиболее частыми являются повреждения, вызванные старением изоляции. Что касается повреждений, вызванных ГИТ, то о них в статье даже не упоминается.

В отчете организации Mitigation Action Plans & Scenarios (MAPS), подготовленном для Министерства энергетики ЮАР [8] отмечается кризисное состояние электроэнергетики в ЮАР из-за отсутствия вложений средств в нее в течение последних 20 лет.

После внимательного рассмотрения доводов, приведенных в упомянутой сенсационной статье [3] и знакомства с результатами анализа повреждений трансформаторов в ЮАР, выполненных многочисленными авторами, возникает сомнение в состоятельности утверждения, приведенного в этой статье и подозрение в попытке искусственного привлечения к объяснению повреждений силовых трансформаторов солнечных бурь с целью списать на них реальные проблемы электроэнергетики.

Ситуация в других странах

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 [9]. Реальные замеры токов ГИТ в силовых трансформаторах во время геомагнитных бурь дают значения, не превышающие 4 – 5 А, то есть очень близкие к значениям, полученным в ЮАР, хотя авторы публикации и отмечают, что ожидаемые токи ГИТ во время других геомагнитных бурь теоретически могут быть и больше.

По трансформаторам в энергосистеме Уругвая экспериментальных данных нет. Теоретические вычисления дают результаты, схожие с данными по Южной Африке.

В южной части Бразилии экспериментально зафиксированы токи ГИТ в силовых трансформаторах за период с 2009 по 2013 годы очень близкие по своим значениям к токам, зафиксированным в ЮАР. На рис.6 показаны токи ГИТ в нейтрали силового трансформатора напряжением 500 кВ во время солнечной бури в Бразилии в октябре 2013 г.

При анализе причин повреждений силовых трансформаторов в Индии, Иране, в Пакистане воздействие ГИТ даже не упоминается.

В Японии зафиксированы значения ГИТ в силовых трансформаторах при солнечных бурях, не превышающие 4 А. [10].

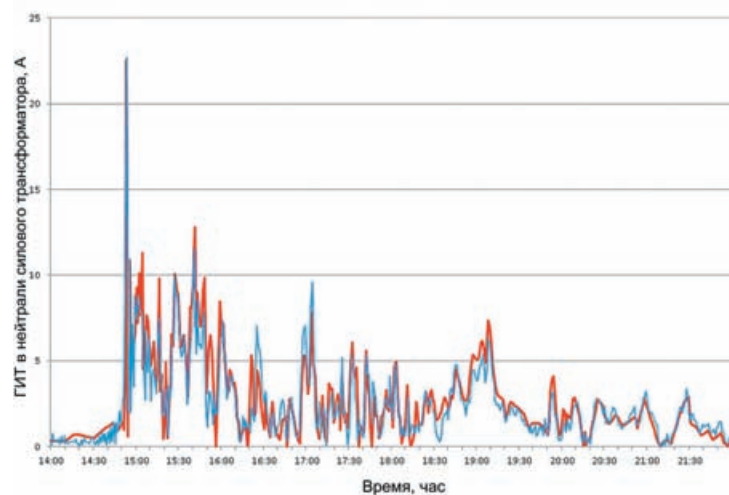


Рис.7

В Новой Зеландии, находящейся достаточно близко к области южного максимума ГИТ, во время сильной солнечной бури в ноябре 2001 г. в нескольких трансформаторах были зафиксированы токи ГИТ с амплитудой, не превышающей 6 А, а в некоторых доходящей до 22 А, [рис.7](#).

Обращает на себя внимание тот факт, что отдельные выбросы ГИТ с амплитудой, превышающей 10 А, имеют очень малую длительность, которая составляет около 20 секунд, в то время, как постоянная нагрузка силовых трансформаторов по данным стандарта [5] составляет 30 – 45 минут, то есть за время этих выбросов температура трансформатора просто не успеет заметно измениться. Но даже и длительные значения ГИТ в пределах 20 – 30 А по данным того же стандарта не достаточны для повреждения силовых трансформаторов.

Таким образом, во всех вышеперечисленных регионах мира, расположенных в Южном полушарии, возникающие во время солнечных бурь геомагнитно-индуцированные токи не достигают значений, способных повредить силовые трансформаторы. Другое дело, что при таких токах в трансформаторах, они превращаются в мощные источники гармоник, влияющих на остальные виды электрооборудования в электрических сетях, и в первую очередь, на реле защиты. Наблюдающиеся в таких режимах ложные срабатывания релейной защиты и отключения трансформаторов объясняется именно таким влиянием. Но это уже совсем другая проблема, имеющая свое решение (например, за счет установки дополнительных фильтров в цепях реле защиты) и не связанная с реальными повреждениями силовых трансформаторов.

Выводы

1. Из проведенного анализа ситуации можно сделать вывод о том, 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 странах ближневосточного региона, в России, Индии и многих других странах.

2. В настоящее время нет экспериментально подтвержденных данных, из которых следовала бы необходимость пе-

ресмотра ранее установленных общепризнанных зон с повышенным уровнем ГИТ, представляющим опасность для силовых трансформаторов.

3. Распространенные во многих документах ссылки на повреждения силовых трансформаторов во время солнечных бурь, якобы имевших место в ЮАР, являются на самом деле несостоятельными и не должны приниматься во внимание при рассмотрении вопроса о необходимости принятия специальных мер по защите силовых трансформаторов в том или ином регионе.

4. Следует обратить внимание на влияние гармоник, генерируемых трансформаторами во время солнечных бурь, на устройства релейной защиты и принять меры, исключающие ложное срабатывание реле защиты из-за насыщения магнитопроводов силовых трансформаторов токами ГИТ.

Литература

1. Гуревич В. И. Силовые трансформаторы тоже подвержены влиянию Солнца - Электротехнический рынок, 2011, № 5, с. 48 - 51.
2. Schulte in den Baumen, H.; Moran, D.; Lenzen, M.; Cairns, I.; Steenge, A.. How severe space weather can disrupt global supply chains. - Natural Hazards and Earth System Sciences, volume 14, Issue 10, 2014, pp.2749-2759.
3. Gaunt C. T., 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.
4. Сушко В. А., Косых Д. А. Геомагнитные штормы. Угроза национальной безопасности России. – Новости электротехники, 2013, № 4.
5. IEEE Std. C57.163-2015: IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances, 2015.
6. Minnaar U.J., Gaunt C.T., Nicolls F. Characterisation of power system events on South African transmission power lines. - Electric Power System Research, 2012, vol. 82, issue 1, pp. 25 - 32.
7. 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, vol. 1, London.
8. Energy Security in South Africa. – Research paper, MAPS, 2014.
9. Marshall R. A., Gorniak H., Van Der Walt T., and other. Observations of Geomagnetically Induced Currents in the Australian Power Network. – Space Weather, Jan.2013, Vol. 11, issue 1, pp. 6 – 16.
10. Watari Shinichi, Kunitake Manabu, Kitamura Kentarou, and other. Effects of Geomagnetically Induced Current on Power Grids. - Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol.56, Nos.1-4 2009, pp. 125 – 133.