

## ИНДУКЦИОННЫЕ ТОКИ В ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Аннотация.** Выполнен анализ возмущения магнитного поля Земли и его влияния на энергосистему. Рассматривается механизм образования геомагнитных индуцированных токов ГИТ, которые могут оказать отрицательное влияние на коммуникации, в том числе и на протяженные высоковольтные электрические сети. Это влияние сводится к негативным факторам: насыщению сердечника силового трансформатора и насыщению сердечника измерительного трансформатора тока за полупериод напряжения сети, поскольку по сравнению с токами промышленной частоты ГИТ можно считать постоянными токами.

**Ключевые слова:** активность солнца, солнечный ветер, магнитная буря, геомагнитный индуцированный ток (ГИТ), поверхностный потенциал, насыщение, спектр гармоник, местный перегрев

В. В. КИРИК, В. И. МОССАКОВСКИЙ

## ИНДУКЦІЙНІ СТРУМИ В МЕРЕЖАХ ДАЛЬНІХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ЗБУРЕННЯХ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

**Анотація.** Виконано аналіз збурення магнітного поля Землі та його вплив на енергосистему. Розглядається механізм утворення геомагнітних індукційних струмів ГІС, які можуть негативно впливати на комунікації, у тому числі й на дальні високовольтні електричні мережі. Цей вплив зводиться до негативних факторів: насичення осердя силового трансформатора та насичення осердя вимірювального трансформатора струму за півперіод напруги мережі, оскільки у порівнянні зі струмами промислової частоти ГІС можна вважати постійними струмами.

**Ключові слова:** активність сонця, сонячний вітер, магнітна буря, геомагнітний індукований струм (ГІС), поверхневий потенціал, насичення, спектр гармонік, місцевий перегрів

V. KYRYK, V. MOSSAKOVSKY

## INDUCTION CURRENTS IN HVAC NETWORKS UNDER EARTH MAGNETIC FIELD DISTURBANCE

**Abstract.** It is analyzed of a magnetic field disturbance of Earth and its influence on a power supply system. The formation mechanism of geomagnetic induced currents which can render subzero influence on communication is considered, including on extended high-voltage electric networks. This influence is taken to the negative effects such as the half-cycle saturation of power transformer and half-cycle saturation of current transformer because in compare to the alternating currents frequency the GIC can be considered direct currents.

**Key words:** activity of the sun, solar wind, geomagnetic storm, geomagnetic induced current (GIC), earth surface potential, saturation, harmonic spectrum, local overheating

**Введение.** Совокупность всех наблюдаемых явлений на солнце, таких как солнечные пятна, факелы, солнечные вспышки, солнечный ветер называют солнечной активностью. В связи с увеличением солнечной активности, увеличением интенсивности солнечного ветра и изменениями геомагнитного поля Земли важное значение приобретают исследования влияния геомагнитных бурь, то есть возмущений магнитного поля планеты, на функционирование систем электроснабжения, особенно, межсистемных (длинных) линий электропередачи, а также выявлению технических проблем электроснабжения и экономических рисков в народном хозяйстве, связанных с этими явлениями.

**Постановка задачи.** В работе проводится анализ причин возникновения постоянной составляющей тока намагничивания силовых трансформаторов, вызванной потенциалами околоземного электрического поля.

Солнце непрерывно выбрасывает в космическое пространство плазму (coronal mass ejections - CMEs), вызывая при этом солнечный ветер, который и оказывает существенное воздействие на Землю.

Увеличение скорости солнечного ветра от среднего числа 400 км/с до 2000 км/с вызывает изменение межпланетного магнитного поля в пределах от 5 нТ до 30 нТ [5].

На сегодня напряженность магнитного поля Земли убывает, причем гораздо быстрее, чем предполагали ученые. За последние 20 лет напряженность геомагнитного поля уменьшилась в среднем на 1,7 процента, что в 10 раз превышает расчетную скорость. При этом в Европе напряженность геомагнитного поля возросла, а в южной части Атлантического океана и в районе Карибских островов уменьшилась на 10 процентов [2].

Взаимодействие солнечного ветра с ионосферой земли приводит к изменениям конвекции магнитосферной плазмы, то есть к колебаниям и скручиванию магнитного поля (магнитным бурям и штормам) более чем 100 нТ и возникновению так называемых кольцевых или геомагнитных токов и струй, циркулирующих над землей на высотах в сотни и тысячи километров [3]. Геомагнитные токи неоднородны, их амплитуда может достигать  $10^6$  А, а потенциал сравним с магнитогидродинамическим генератором мощностью  $10^6$  МВт. Изменение же токов и их смещение приводит к изменениям магнитного поля Земли. В результате на поверхности Земли, согласно закону Фарадея  $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ , возникает разность потенциалов электрического поля и, как следствие, в протяженных линиях электропередач возникают геомагнитные индукционные токи ГИТ (Geomagnetically induced currents GIC). Эти токи имеют место не только в проводниках линий электропередач, но также и в телекоммуникационных кабелях и магистралях трубопроводов как на поверхности земли, так и под землей [14]. Чем более протяженное пространственное положение проводящего объекта, тем сильнее эффект воздействия и риск повреждения.

Исследования зарубежных ученых показывают, что, предположительно, потенциалы, вызывающие ГИТ, могут оказать влияние на коммуникации, в том числе и высоковольтные электрические сети, а также на силовые трансформаторы, расположенные в Северной Америке выше 35-ой параллели, в Европе выше 40-ой параллели и в Южной Африке, особенно если в этих районах имеют место магнитные аномалии или морское побережье [4]. Реально зафиксированные явления геомагнитных возмущений в виде атмосферных сияний при мощных возмущениях на солнце в октябре – ноябре 2003 года были на широте Москвы и Одессы [1].

**Анализ процессов возникновения поверхностного потенциала.** Поверхностный потенциал, будучи приложенным между заземленными нейтральми высоковольтных трансформаторов по концам линии электропередачи, вызывает протекание между ними тока (рис.1). Типичный период колебаний, возникающих в магнитном поле Земли, а также поверхностный потенциал и, следовательно, ток в проводах ЛЭП составляет

1–0,001 Гц (период 1–1000 с). В сравнении с частотой энергосистемы 50 Гц индуцированный ток можно считать постоянным [6].

В ходе исследований, исходя из допущений о проводимости земли и полярных токах, ученые США, Финляндии и Канады пришли к выводу, что величина поверхностного потенциала электрического поля лежит в пределах 1–10 В/км [13]. Значение поверхностного потенциала отличается по широте, а на его величину оказывает влияние электрическая проводимость земли, геологические разломы, близость морского побережья и другие геологические факторы.

Как показывают исследования [11], предположение о предпочтении направления кольцевых токов в ионосфере «восток–запад» на сегодня является не совсем адекватным, так как характер направления токов является более сложным и неоднородным. Зафиксированы моменты, когда производная магнитной индукции по широте в разы превышала производную по долготе.

Фактически в электроэнергетических системах влияния геомагнитных индукционных токов и все проблемы с оборудованием, функционированием релейной защиты сводятся к двум негативным факторам: насыщение сердечника силового трансформатора и насыщение сердечника измерительного трансформатора тока за полупериод напряжения сети.

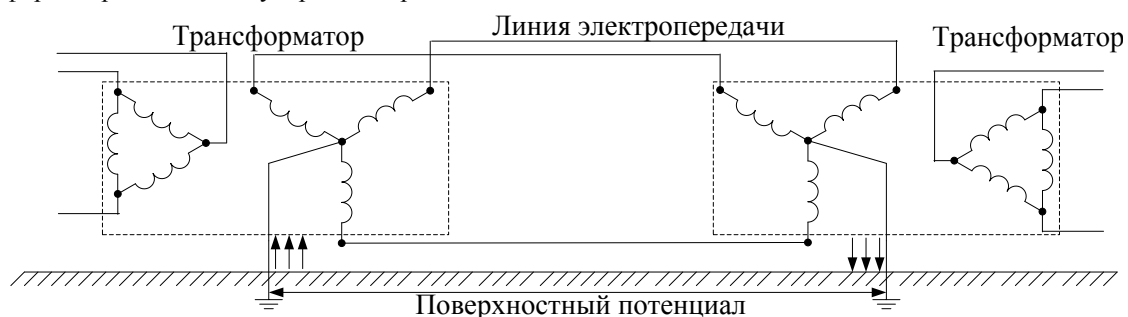


Рис.1. Воздействие поверхностного потенциала на электрическую сеть

В нормальном режиме работы трансформатора наблюдается квазилинейное соотношение между входящими током и напряжением, и между выходящими соответственно. В случае наличия постоянного тока рабочая точка магнитной цепи стального сердечника трансформатора смещается в сторону нелинейности или насыщения, которое возникает уже за полупериод переменного тока. Полупериод, в котором возникает насыщение, зависит от полярности тока намагничивания, что продемонстрировано на рис.2.

Насыщение сердечника может приводить к таким проблемам:

- возникновению значительного тока намагничивания с предельным значением при насыщении, местному перегреву и увеличению потерь в обмотках трансформатора;
- трансформатор начинает генерировать в энергосистему широкий спектр четных и нечетных гармоник, которые могут перегрузить конденсаторные батареи и вызвать ложное срабатывание релейной защиты;
- резко возрастает потребление трансформатором реактивной мощности;
- возможны механические разрушения конструкции от местного перегрева при интенсивном воздействии магнитного потока рассеивания.

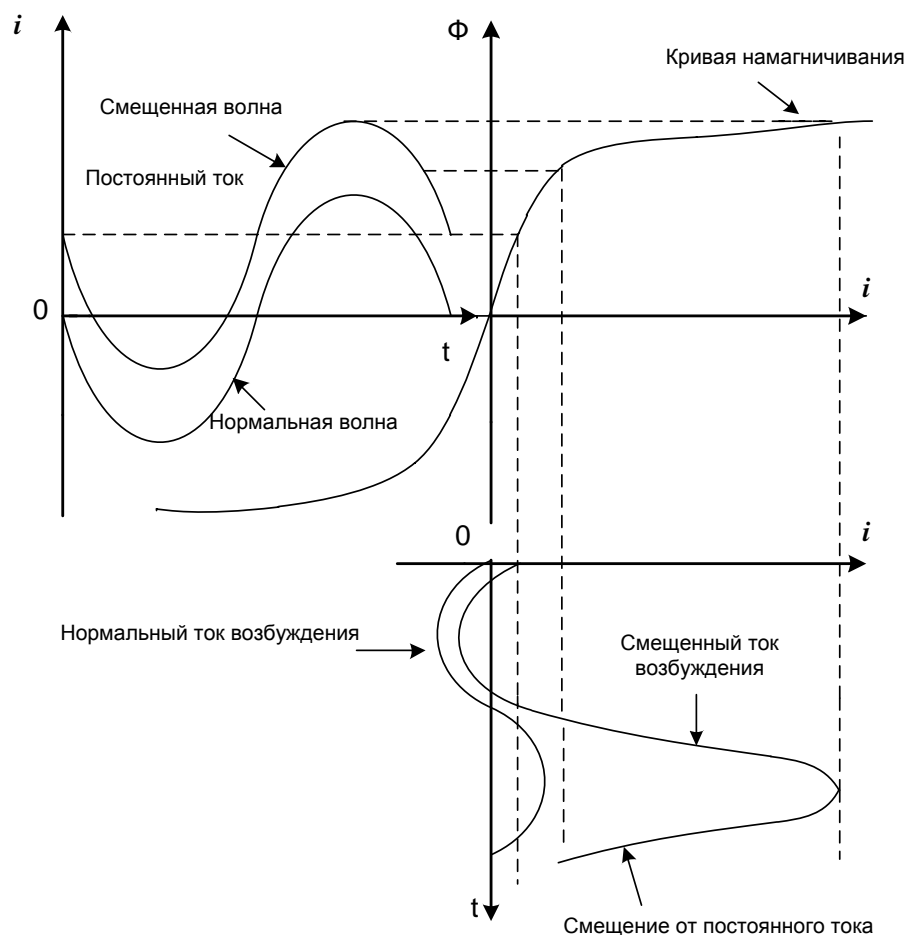


Рис.2. Смещение рабочей точки магнитной системы трансформатора

Геомагнитные индукционные токи в периоды магнитных бурь постоянно фиксируются в энергосистемах мира. Величина ГИТ через нейтраль трансформаторов может быть во много раз больше, чем среднеквадратический переменный ток намагничивания трансформатора.

Как пример воздействия ГИТ можно привести события марта 1989, когда во время гигантской вспышки на солнце из солнечного пятна произошел огромный выброс массы рентгеновского излучения и заряженных частиц, которая начала движение в сторону Земли [12]. Через 2 дня она достигла Земли и вызвала одну из самых мощных магнитных бурь XX столетия. Магнитное поле планеты захватило часть протонов и электронов, создав интенсивное полярное сияние, освещавшее небо над Флоридой и Техасом,

и даже южнее. Параллельно пострадали системы связи, спутники на околоземных орбитах и энергосистемы Северной Америки и Европы, в том числе и Великобритании [13].

Наихудшее произошло ночью в 2 часа 45 минут по восточному поясному времени, когда фактически вся территория Канады погрузилась во тьму. Отдельные сильные возмущения магнитного поля «посадили на ноль» всю энергетическую систему Квебека, включая Монреаль и Квебек. Несколько мощных трансформаторов на территории Канады и США вышли из строя. Зарегистрировано сотни срабатываний систем релейной защиты и автоматики. Энергосистема испытывала снижения уровней напряжения и необычные качания потоков активной и реактивной мощности.

В результате 21500 МВт генерации было утрачено. На протяжении девяти часов 17% нагрузки в районе Квебек оставались без питания.

События, имеющие место в энергосистемах стран мира, связанные так или иначе с ГИТ, имели и имеют место сегодня. Одно из последних наиболее мощных воздействий геомагнитных индукционных токов – это отключения в энергосистеме Швеции в октябре 2003 года [16]. В первой половине XX-ого века линии электропередачи были гораздо менее чувствительными, поскольку были непротяженными и не взаимосвязанными. На сегодня изменились и линии электропередач, как по протяженности, так и по оснащению электронными микропроцессорными средствами защиты, мониторинга и диагностики, и резко возросла мощность потоков плазмы в космическое пространство.

#### **Выводы.**

Исходя из проведенного анализа, необходимо отметить, что влияние космической погоды может иметь место как в виде ГИТ на силовое оборудование электроэнергетических систем, так и на электронное оборудование управления в виде отказов и сбоев.

Отключения в энергосистеме из-за геомагнитных бурь, имеющие локальный характер в виде выхода из строя трансформаторов или линий электропередачи, на сегодня могут быть более масштабными по территории и более тяжелыми в технико-экономическом плане с разрушением электроэнергетической системы.

Учитывая важность вопроса энергетической безопасности, необходимо провести анализ геомагнитной ситуации территории Украины с привязкой магнитных полей по территории к проводимости грунтов и расположению магистральных линий электропередачи, а также выполнить моделирование процессов в указанных линиях на предмет определения критических сечений при возникновении геомагнитных индукционных токов.

#### **Литература**

1. Кузнецов В.Д., Махутов И.А. Физика солнечного земного воздействия и проблемы безопасности энергетической инфраструктуры страны//Вестник российской академии наук, т.82, №2.-2012, 110-123 С.
2. Клименко В.В., Газина Е.А. Анализ изменений климата Восточной Европы в последние 250 лет по инструментальным данным//Вестн. МГУ.- 2008.- №3.-С. 60-66
3. Tsurutani, B., Gonzalez W. The interplanetary causes of magnetic storms: A review, Magnetic Storms, AGU Geophysical Monograph 98, 77, 1997.
4. Hurllet P., berthureau F. Impact of geomagnetic induced currents on power transformer design/ JST Transformateurs (France).-Mat Post #7
5. Bernhardt E.H., Cilliers P.J., Gaunt C.T. Improvement in the modelling of geomagnetically induced currents in southern Africa:South African Journal of Science 104, 2008
6. Koen J. and Gaunt C.T. (2002). Geomagnetically induced currents at mid-latitudes. In Proc. International Union of Radio Science (URSI) General Assembly, Maastricht.
7. Viljanen A., H. Nevanlinna, K. Pajunp.a.a, and A. Pulkkinen, Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator, Ann. Geophys., 19, 1107, 2001.
8. Larose D. Effect of Solar-Geomagnetic Disturbances on Power Systems // The Hydro-Quebec blackout of March 13, 1989/ IEEE Special Publication 90TH0291-5 PWR,1989.
9. John G. Kappenman, Vernon D. Alberston, "Bracing for the geomagnetic storms," IEEE Spectrum, pp.27 – 33, Mar. 1990.
10. Elias A.G., Silbergleit V.M. Strong geomagnetic disturbances and induced currents on Earth surface // progressIn Electromagnetics Research Letters, 2008, V.I. P. 139-148.
11. Pulkkinen A., Limdahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storms of 29-31 October 2003:Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high voltage power transmission system // AGU Space Weather Jornal. 2005. V.3 P.19.