

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.317.7

### СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В НЕЙТРАЛЯХ СИЛОВЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

© 2012 г. М. Б. Баранник, А. Н. Данилин, Ю. В. Катькалов\*,  
В. В. Колобов, Я. А. Сахаров\*, В. Н. Селиванов

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН  
Россия, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14*

*\*Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН  
Россия, 183010, Мурманск, ул. Халтурина, 15*

*E-mail: postmast@ien.kolasc.net.ru*

Поступила в редакцию 03.05.2011 г.

Описана система цифровой регистрации квазипостоянных токов, возникающих в нейтральных автотрансформаторов под воздействием магнитосферных возмущений (диапазон частот 0–2 Гц), позволяющая проводить синхронные измерения на нескольких силовых подстанциях. Рассмотрены методы измерения, первичной обработки и передачи измерительной информации от станций сбора данных в удаленный центральный сервер с использованием канала сотовой связи. Приведены принципиальные схемы блоков и примеры результатов измерений, сопоставленные с вариациями геомагнитного поля.

Во время магнитосферных возмущений на поверхности Земли, преимущественно в высоких широтах, развиваются медленно изменяющиеся электрические и магнитные поля. Электрические поля являются причиной теллурических токов, протекающих как в земле, так и в любых заземленных токопроводящих системах, в том числе линиях электропередач, сигнальных кабелях, трубопроводах и т.п. Поскольку в периоды сверхсильных магнитных бурь геоиндуктированные токи (г.и.т.) могут явиться причиной серьезных аварий в энергосистемах [1–3], актуальной является задача постоянного мониторинга наведенных медленно меняющихся (квазипостоянных) токов в системах энергоснабжения.

В настоящее время существует несколько способов регистрации г.и.т. в линиях передач, в том числе величину медленно меняющегося тока можно определить градиентными измерениями магнитного поля вблизи ЛЭП [4] или измерением тока в глухозаземленной нейтрали трансформатора на силовой подстанции. В последнем случае пользуются измерениями падения напряжения на шунтирующем сопротивлении в цепи нейтрали [5] либо измеряют ток измерительными клещами с датчиком Холла [6].

Нами разработана система регистрации квазипостоянных токов в нейтральных автотрансформаторов, позволяющая проводить синхронные измерения на нескольких силовых подстанциях. Полученная информация хранится в компьютерах, осуществляющих управление системами сбора данных на подстанциях, и передается по уста-

новленному графику в центральный пункт сбора информации.

Структурная схема системы регистрации г.и.т. представлена на рис. 1. В качестве датчика тока, протекающего в нейтрали автотрансформатора, были использованы серийно выпускаемые клещи-адаптеры токовые АТА-2502 производства компании “Актаком” (Россия) [7] с датчиком Холла открытого типа. Выбор первичного датчика тока подробно рассмотрен в [8]. Клещи выбранного типа смыкаются вокруг шины с током без разрыва цепи, обеспечивая гальваническую развязку между шиной нейтрали и электрическими цепями измерительного блока.

Токовые клещи АТА-2502 имеют аналоговый выход, напряжение на котором прямо пропорционально току, протекающему через проводник. Основные технические характеристики АТА-2502: предел измерений 0–200 А, погрешность  $\pm(1.5\% + 1 \text{ А})$ ; частотный диапазон 0–400 Гц; коэффициент преобразования 1 мВ/А; напряжение питания 9 В. Дрейф установленного нулевого уровня выходного напряжения, возникающий вследствие остаточной намагниченности магнитной системы, и температурный дрейф корректируются программно на этапе обработки результатов измерений.

Сигнал с выхода токовых клещей (ТК) поступает на инструментальный усилитель (ИУ), выполненный на основе микросхемы AD623 (рис. 2). Выбором соответствующего коэффициента усиления инструментального усилителя обеспечивается согласование выходного диапазона клещей и

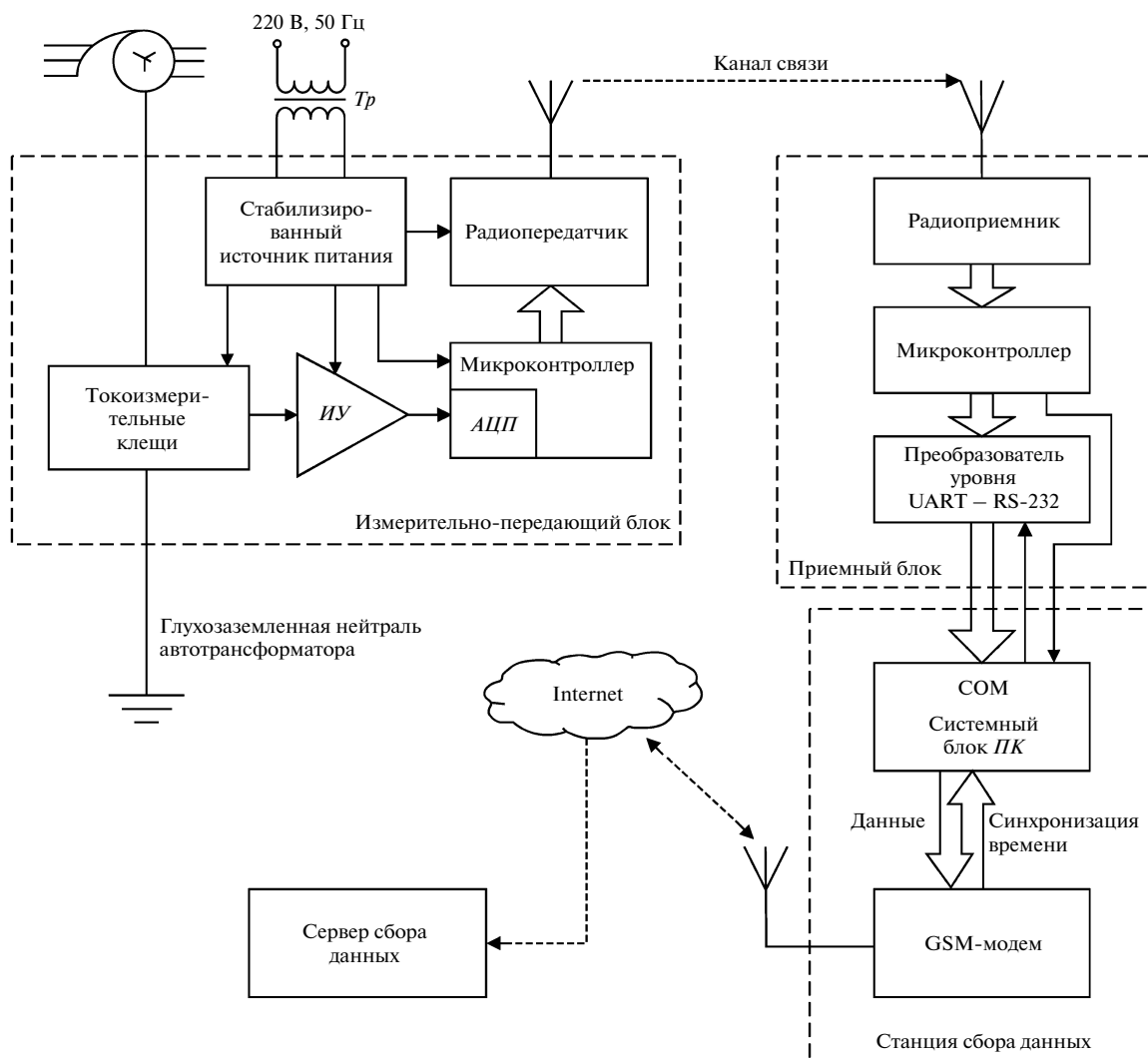


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации геоиндуктированных токов. ИУ – измерительный усилитель; ПК – персональный компьютер; АЦП (а.ц.п.) – аналого-цифровой преобразователь.

входного диапазона а.ц.п. 0–2.5 В, который в свою очередь определяется использованием внешнего стабильного источника опорного напряжения на микросхеме REF192. Применение инструментального усилителя позволяет использовать для питания ТК тот же источник, что и для остальной схемы измерительно-передающего блока.

Для преобразования входного аналогового сигнала в цифровой вид и дальнейшей обработки данных для последующей передачи по каналу связи в приемный блок, в измерительно-передающем блоке используется 8-битный AVR-микроконтроллер ATmega8, имеющий в своем составе 6-канальный 10-разрядный а.ц.п. [9]. С выхода инструментального усилителя положительная полуволна сигнала поступает непосредственно на один из каналов а.ц.п. На другой канал поступает инвертированная отрицательная полуволна. В качестве инвертора используется операцион-

ный усилитель OP77FJ. Таким образом, динамический диапазон преобразования входного сигнала увеличивается до 11 бит. Диоды  $D_1$ ,  $D_2$  обеспечивают защиту входов а.ц.п. от напряжения отрицательной полярности с уровнем  $>0.5$  В. Микроконтроллер осуществляет преобразование сигнала по следующему алгоритму:

- 4 раза в секунду производит выборку входного сигнала и его дискретизацию с частотой 14769.23 Гц, длительность выборки составляет 125 мс;

- оцифрованный сигнал подвергается преобразованию Фурье с выделением постоянной составляющей, первой, второй и третьей гармоник сети 50 Гц;

- преобразование данных в последовательный формат для передачи по каналу связи в приемный блок; в пакете передаются следующие значения компонент полного тока, протекающего через

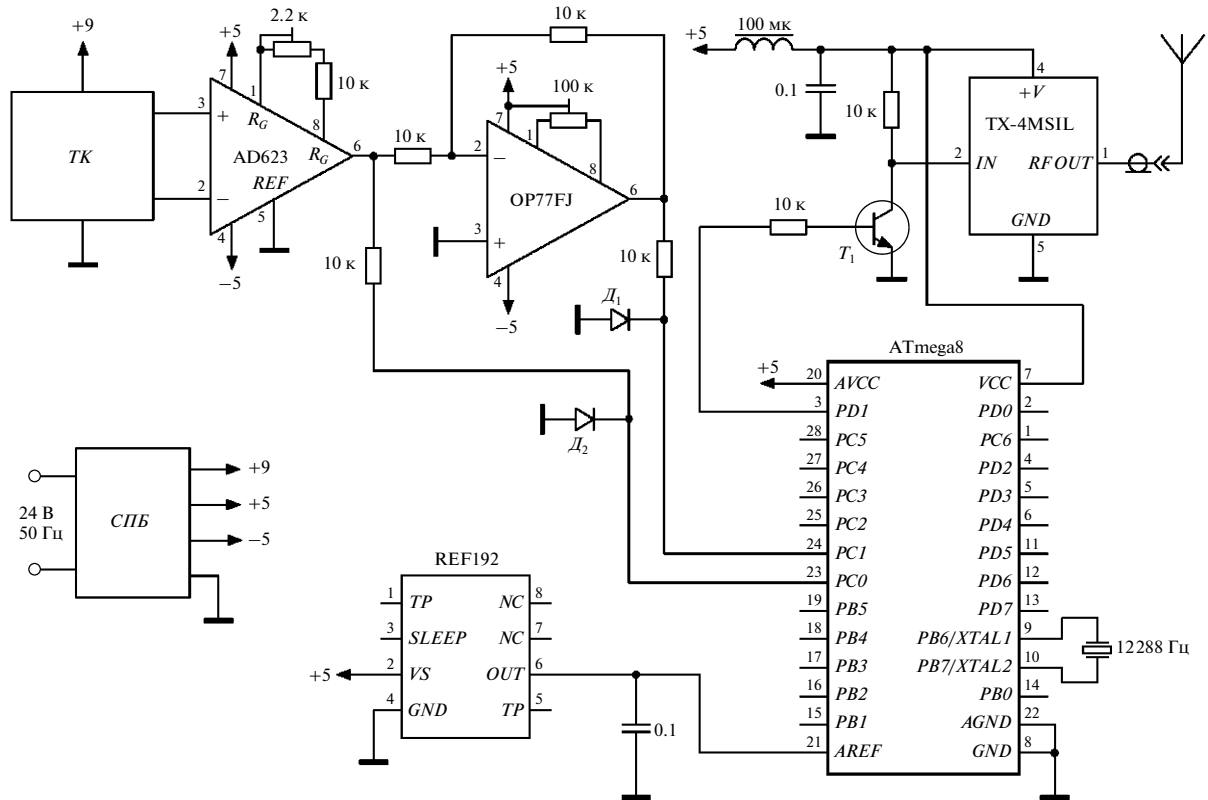


Рис. 2. Принципиальная схема измерительно-передающего блока. ТК – токоизмерительные клещи; СБП – стабилизированный блок питания.

нейтраль: квазипостоянная составляющая, несущая информацию непосредственно о г.и.т. (диапазон частот 0–2 Гц); амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоники сети, позволяющие оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании геоиндуктированных токов значительной амплитуды; формат передаваемых данных определяется стандартом встроенного в микроконтроллер приемопередатчика асинхронного последовательного протокола UART;

– передача пакета данных по каналу связи – используется радиоканал с несущей частотой 433.92 МГц и амплитудной манипуляцией: передатчиком является микросборка TX-4MSIL (фирма AUREL, Италия) с максимальной выходной мощностью 1.5 мВт [10]; для предохранения от наводки сигнала передатчика на систему сбора в момент передачи данных блокируется выборка сигнала ТК.

В состав измерительно-передающего блока входит многоканальный стабилизированный блок питания (СБП), формирующий необходимые напряжения для питания всех цепей блока ( $\pm 5$  В) и ТК (+9 В).

Конструктивно измерительно-передающий блок представляют собой герметизированный металли-

ческий контейнер, закрепленный непосредственно на шине заземления нейтрали автотрансформатора на территории открытого распределительного устройства подстанции. Передатчик размещен в отдельном корпусе с внешней антенной и крепится к основному контейнеру. Переменное напряжение 24 В подается на СБП от понижающего трансформатора  $T_p$  (рис. 1), который размещается в ближайшем шкафу управления и питается от сети собственных нужд подстанции. Так как измерительно-передающий блок находится в жестких климатических условиях, то кроме герметизации корпуса используется регулируемый подогрев блока (нагревательный элемент и цепи регулирования на схеме не показаны).

В приемном блоке (рис. 3) в качестве приемника используется специализированная микросборка RX-4MM5 фирмы AUREL [10]. Цифровой сигнал, снимаемый с выхода приемника, после инвертора на транзисторе BC817 поступает на преобразователь уровня сигнала MAX232 для передачи по интерфейсу RS-232 в последовательный COM-порт станции сбора данных (с.с.д.).

Станция сбора данных, устанавливаемая в помещении общеподстанционного пункта управления, представляет собой обычный системный блок персонального компьютера, работающий под

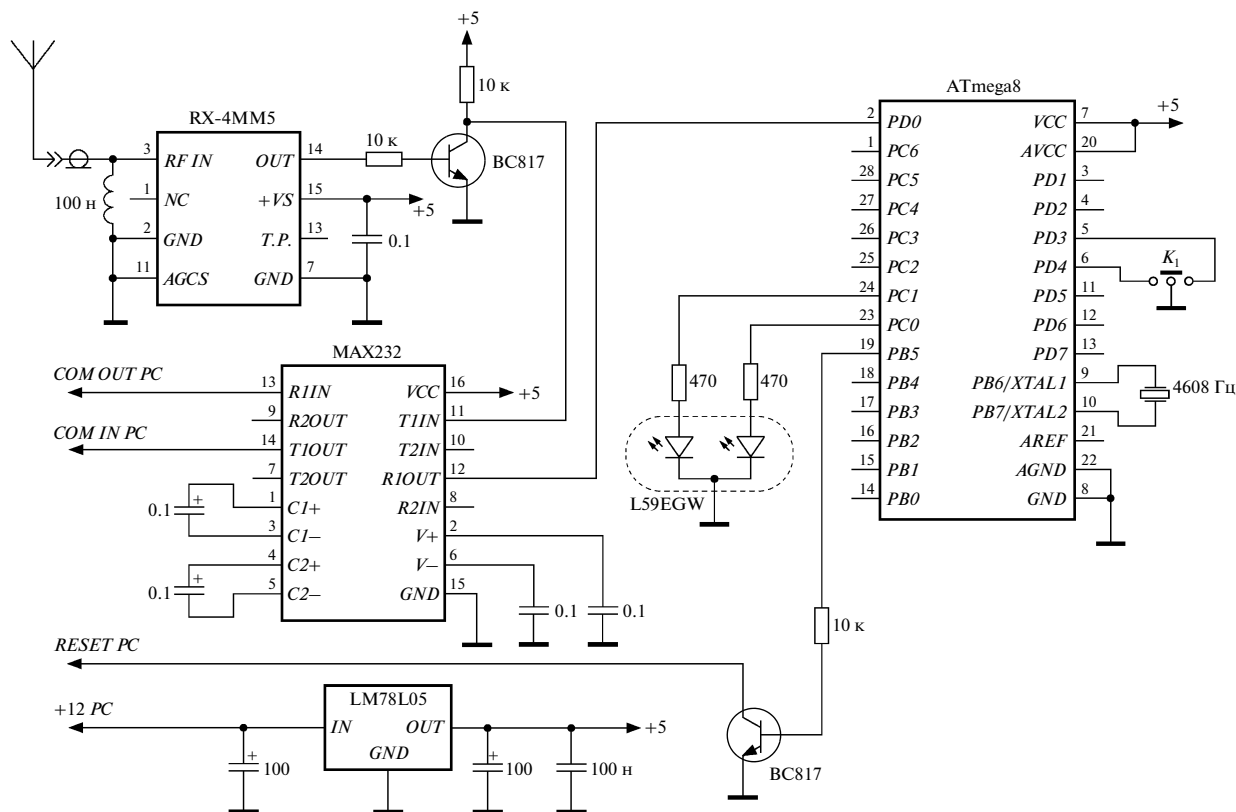


Рис. 3. Принципиальная схема приемного блока.

операционной системой Windows XP Pro. Чтобы избежать потерь данных, связанных с возможным зависанием компьютера, в состав блока регистрации был включен сторожевой (watchdog) таймер на AVR-микроконтроллере ATmega8.

Алгоритм его работы состоит в следующем: управляющая программа обработки данных, установленная в станции сбора данных, посылает сигнал активности в COM-порт. Этот сигнал после преобразователя уровня MAX232 поступает в микроконтроллер приемного блока. В микроконтроллере организован 10-секундный таймер, сброс которого осуществляет сигнал активности. Если произошел программный сбой и сигнал активности перестает поступать, то по завершении цикла 10-секундного таймера формируется сигнал аппаратной перезагрузки с.с.д. (ключ BC817 замыкает контакты RESET системного блока).

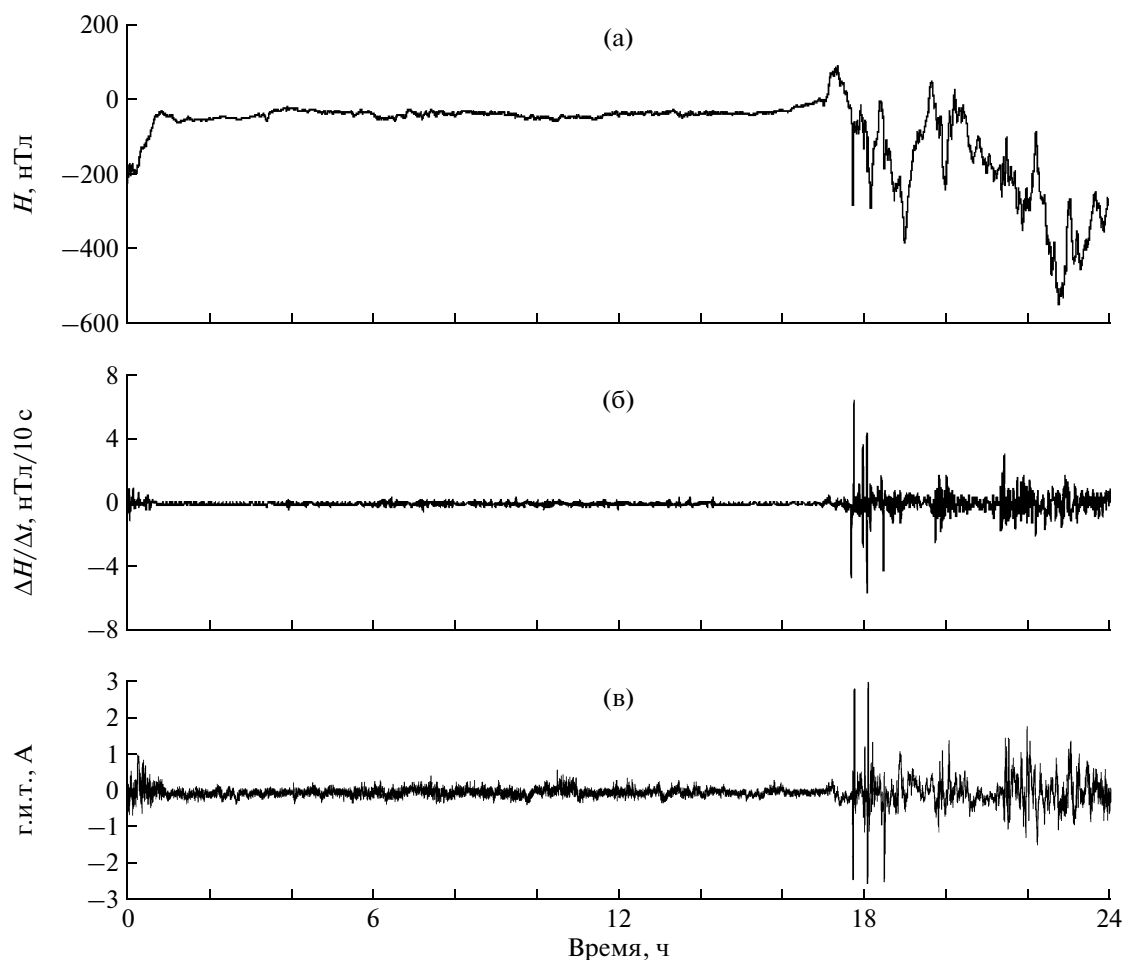
Одновременно в микроконтроллере запускается таймер с выдержкой 10 мин. За это время должна произойти перезагрузка системы и запуск специализированного программного обеспечения (ПО). Если этот процесс произошел штатно, то возобновившийся сигнал активности сбрасывает 10-минутный таймер, и контроллер снова переходит в режим 10-секундного таймера. Если же 10-минутный таймер закончил свою работу, а

сигнал активности отсутствует, что свидетельствует о неудачной перезагрузке, то происходит повторная перезагрузка с.с.д.

Статусные светодиоды (L59EGV на рис. 3) отображают состояние приемного блока и с.с.д. С помощью переключателя  $K_1$  выбирается скорость передачи данных для адаптации к конкретному каналу связи. Питание всех цепей приемного блока напряжением +5 В осуществляется от линейного стабилизатора LM78L05, который подключен к выходу +12 В блока питания с.с.д.

В зависимости от технических условий и расположения оборудования на подстанциях, в системе сбора передача данных в приемный блок может осуществляться по кабелю, так на подстанции № 204 был применен канал связи на основе проводного интерфейса "токовая петля".

Для передачи измерительной информации на сервер сбора данных используется канал сотовой связи. Соответственно в состав станции сбора данных входит GSM-модем (рис. 1). Преимущества GSM/GPRS-канала связи для передачи информации и критерии выбора GSM-модема рассмотрены в [6]. В описываемой системе использован модем T-Modem PCI/G10 компании Teltonika (Россия) [11]. Эта модель устанавливается в PCI-слот материнской платы с.с.д. и имеет выносную



**Рис. 4.** Магнитограмма горизонтальной  $H$  компоненты магнитного поля Земли (а), ее производная по времени (б) и геиндуцированный ток в нейтрали автотрансформатора подстанции № 31 пос. Ревда (в) за 1 февраля 2008 г.

антенну с длинным кабелем. Такой модем не требует дополнительного источника питания, включается и перезагружается одновременно с системным блоком с.с.д., обменивается данными непосредственно через системную шину.

Прикладное ПО с.с.д. выполняет следующие функции: получение потока данных из последовательного порта, разделение его на составляющие, соответствующие четырем информационным каналам (величина г.и.т. и амплитудные значения трех гармоник тока промышленной частоты), нормализацию каналов и запись информации на жесткий диск. В настоящий момент использован следующий алгоритм: каждый час записывается отдельный файл данных, и в конце суток, при отсутствии сбоев, эти файлы объединяются в суммарный суточный файл. Если в течение суток были перерывы в записи часовых файлов, например, из-за перезагрузки компьютера, сохраняются файлы с данными, записанными до и после перезагрузки. В конце каждого дня полученные файлы пересылаются на сервер сбора данных.

Для сопоставления г.и.т. с вариациями магнитного поля Земли данные измерений должны быть привязаны ко времени. Такая привязка происходит в момент создания нового файла в 00:00:00 по всемирному координированному времени (UTC). Таким образом, источником времени являются системные часы с.с.д. Так как этот источник не является достаточно стабильным, необходимо периодически проводить его коррекцию либо с помощью GPS/ГЛОНАСС-приемника, либо используя NTP – сетевой протокол для синхронизации времени.

Для использования NTP необходимо соединение через Интернет с серверами точного времени. Точность синхронизации с использованием NTP составляет примерно 10 мс, что вполне достаточно для регистрации г.и.т. с периодом выборки 250 мс. Так как в с.с.д. уже входит GSM-модем, то логичным является его использование для синхронизации системных часов по протоколу NTP. Коррекция времени проводится раз в сутки сразу после отправки данных, но периодичность может быть

легко изменена при необходимости получения большей точности.

Данные со станций сбора отправляются на публичный почтовый сервер в виде сообщения с вложенным файлом, гибкость использованной системы позволяет в любой момент изменить способ транспортировки [8].

Все файловые манипуляции можно было возложить на основную программу, однако для повышения надежности ее работы эту задачу выполняет отдельное ПО. Так как все операции выполняются периодически по заданному графику, то для этих целей используется компактный (размер 900 Кбайт), но функциональный планировщик и менеджер автоматизации `nnCron`. Это ПО имеет собственный скриптовый язык, основанный на синтаксисе языка программирования Форт, также понимает `cron`-формат Unix и управляется с помощью текстовых кронтаб-файлов [12].

После того как основная программа закрывает суточные файлы данных на запись, планировщик в указанное время следующих суток создает архивный файл. Затем, в случае успешного установления Интернет-соединения (пять попыток дозвона, 60 с паузы между попытками), посредством почтового клиента данные пересылаются на почтовый сервер (также пять попыток с таким же интервалом). После этого, в рамках той же сессии, происходит синхронизация системных часов, затем соединение разрывается.

Одной из особенностей планировщика `nnCron` является так называемый “непотопляемый режим”, который обеспечивает автоматический перезапуск `nnCron` в случае возникновения фатальной ошибки. Опыт эксплуатации системы показал, что используемый GSM-модем периодически (через неделю непрерывной работы) подвержен “зависанию” в режиме GPRS. Проблема была решена посредством ежедневной аппаратной перезагрузки модема перед началом сеанса передачи данных. Перезапуск осуществляется кратковременным замыканием контакта “Reset” модема, генерацию сигнала перезагрузки также инициирует планировщик задач `nnCron`.

В настоящее время Центром физико-технических проблем энергетики Севера и Полярным геофизическим институтом КНЦ РАН развернута и проходит испытания сеть мониторинга г.и.т. на подстанциях Кольской энергосистемы, выполненная на основе описываемой системы регистрации. С 2006 г. проводится регистрация г.и.т. на

подстанции № 31 пос. Ревда, в 2010 г. система установлена на подстанции № 204 г. Апатиты.

Пример регистрации г.и.т. в нейтрали автотрансформатора подстанции № 31 пос. Ревда, магнитограмма горизонтальной  $H$  компоненты магнитного поля Земли, зарегистрированной магнитовариационной станцией обсерватории Ловозеро, и производная горизонтальной компоненты геомагнитного поля за 1 ноября 2006 г. приведены в [13]. Аналогичные данные за 1 февраля 2008 г. представлены на рис. 4. Вариации г.и.т. во времени совпадают с изменениями производной горизонтальной компоненты геомагнитного поля, что свидетельствует о несомненной связи явлений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин А.Н., Остафийчук Р.М., Сахаров Я.А. // Сб. научных трудов Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: Изд-во ВГУ, 2003. С. 262.
2. Данилин А.Н., Остафийчук Р.М., Сахаров Я.А. и др. // Труды 8-го международного симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. С.-Петербург, 16–19 июня 2009. СПб, 2009. С. 237.
3. Lehtinen M., Pirjola R. // Ann. Geophys. 1985. V. 3. № 4. P. 479.
4. Viljanen A.T., Pirjola R.J., Pajunpaa K.M., Pulkkinen A. // 8-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. St-Petersburg, 16–19 June 2009. P. 227.
5. Elovaara J., Lindblad P., Viljanen A. et al. // Paper 36–301 of the Proceedings of the CIGRE General Session 1992. Paris, France, 31 August–5 September 1992. P. 10.
6. Катькалов Ю.В., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. // Сб. научных трудов “Научно-технические проблемы развития энергетики Севера”. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. С. 114.
7. <http://www.aktakom.ru/kio/>
8. Данилин А.Н., Колобов В.В., Селиванов В.Н. // Сб. научных трудов “Научно-технические проблемы развития энергетики Севера”. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. С. 120.
9. ATmega8 Microcontroller data sheet [www.atmell.com]
10. TX-4MSIL, RX-4MM5 data sheets [www.aurel.it]
11. <http://www.teltonika.ru/devices.htm>
12. [http://nncron.ru/index\\_ru.shtml](http://nncron.ru/index_ru.shtml)
13. Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M. // Proc of 7-th International symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. St-Petersburg, June 26–29 2007. IEEE Cat. № 07EX1804C P. 291.