**Автоматизированная система мониторинга динамических параметров и вертикальности мачт/башен антенных сооружений**

**Vladimir Ciclicci¹**, **Vasile Chiriac²**, **Mihail Iacob³**

¹ Dr. tech. science, Softcom S.A., Decebal 76 Bvd, Chișinău, MD-2038, Moldova Republic of. E-mail: [vciclicci@gmail.com](mailto:vciclicci@gmail.com)

² Assoc. professor, Technical University of Moldova, Stefan cel Mare Bvd 168, MD-2004, Chișinău, Moldova Republic of. E-mail: [vasile.chiriac@clge.eu](mailto:vasile.chiriac@clge.eu)

³ General Director,Radocomunicatii I.S., Drumul Viilor Str, 28/2, MD-2021, Chișinău, Moldova Republic of. E-mail: [mihail.iacob@radicom.md](mailto:mihail.iacob@radicom.md)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы разрабатываются новые информационные и электронные технологии, такие как MEMS [1], мобильный интернет, облачные вычисления, SCADA [2] и т. д. Также на их основе разрабатываются новые методы и автоматизированные системы геодезического мониторинга высотных сооружений.

Актуальными являются вопросы создания современных автоматизированных систем мониторинга высотных сооружений на основе современных передовых технологий.

В данной статье описывается опыт разработки и внедрения автоматизированной системы контроля параметров таких высотных объектов, как мачты и вышки радиотелевизионных установок в Республике Молдова.

В статье также рассматриваются теоретические и практические вопросы расчета технических параметров, таких как колебания и вертикальность, по данным двухосевых MEMS-датчиков (инклинометров), включенных в систему.

В статье описывается архитектура системы мониторинга, основы инженерных измерений и расчетов, приводится практический пример расчетов для радиотелевизионного соответствия.

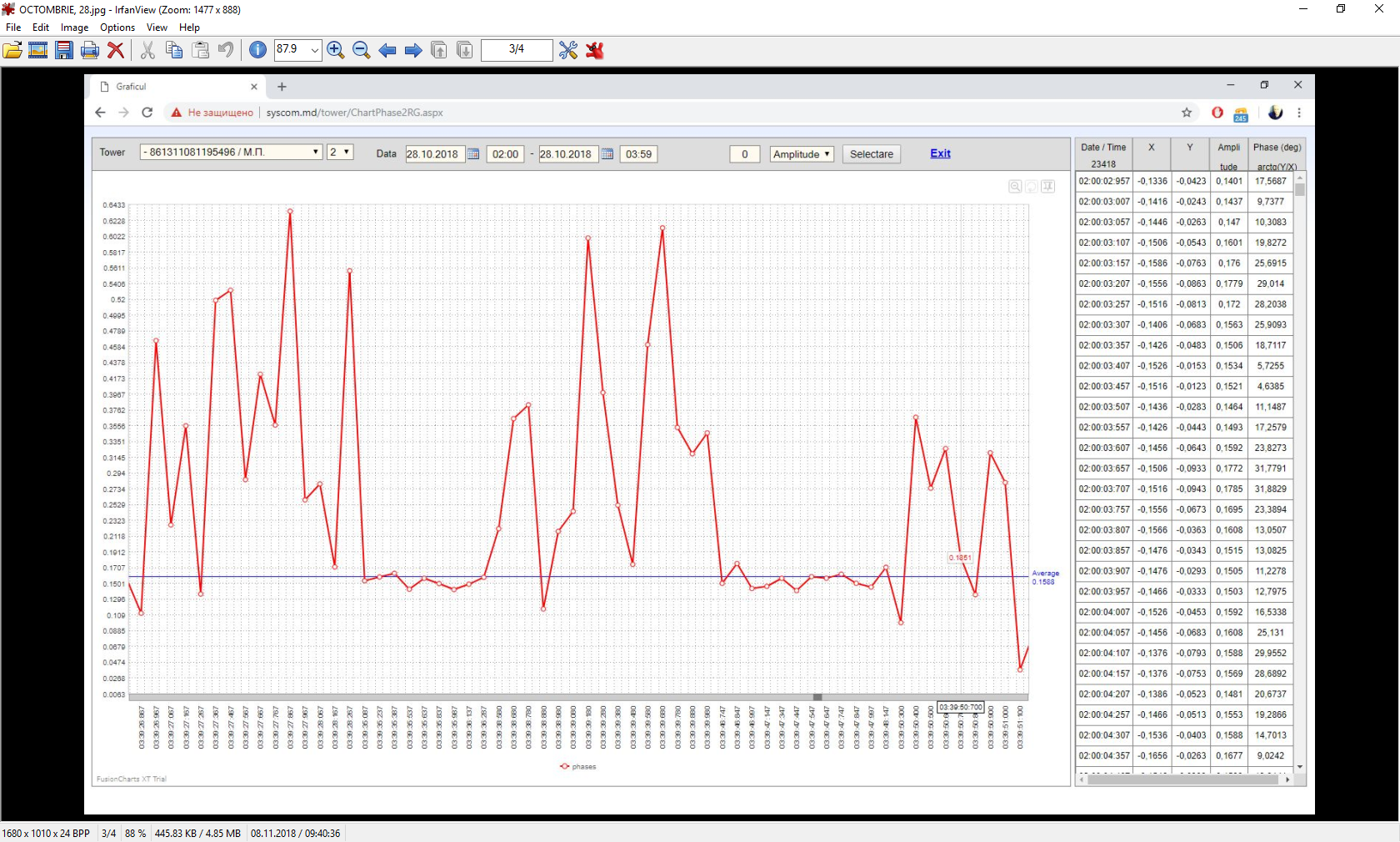
1. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

На фиг.1 показана общая схема Системы.

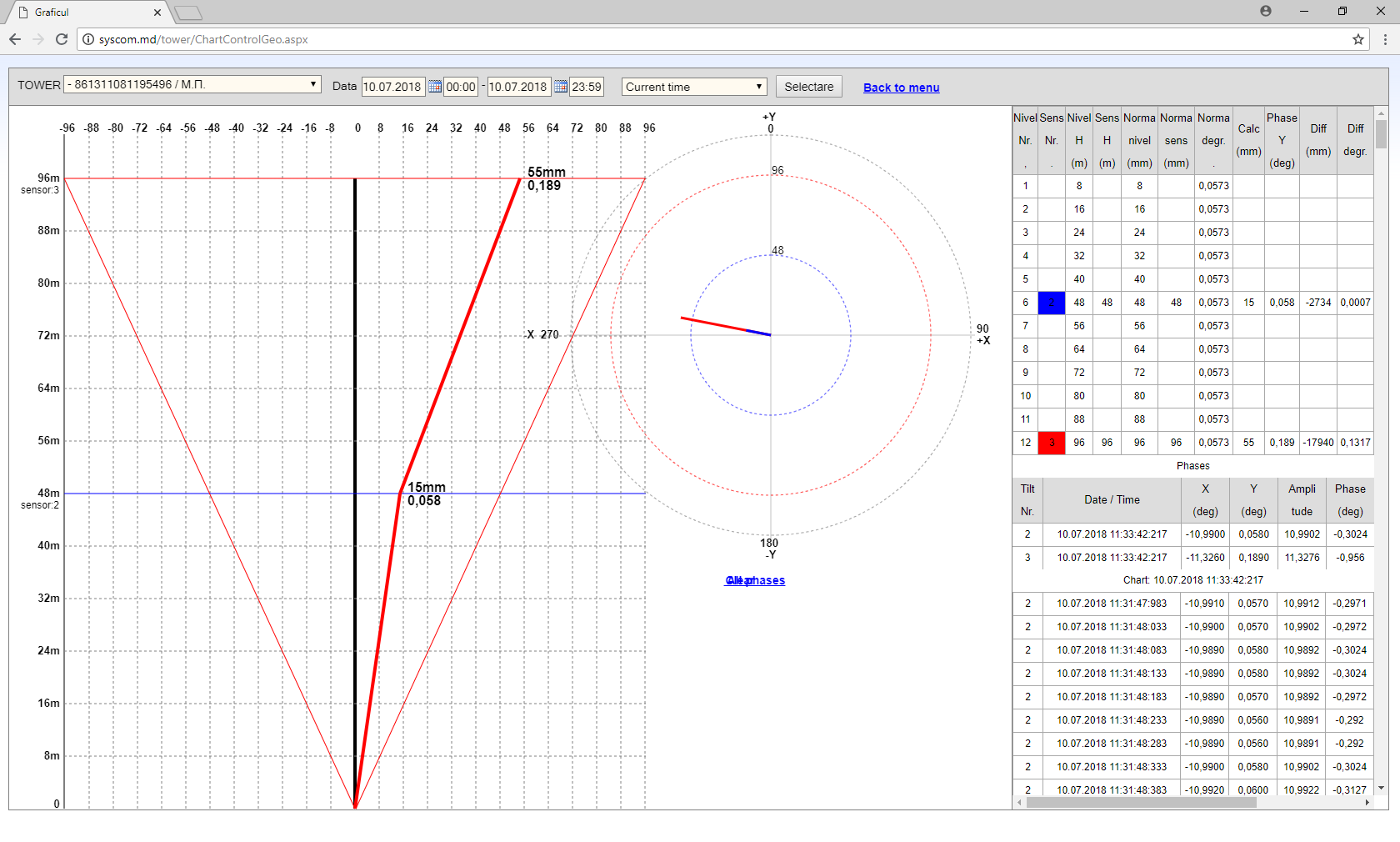
Слева показана мачта, на которой жестко установлены сенсоры/инклинометры на уровнях крепления оттяжек (поддерживающих и регулирующих наклон мачты). Сенсоры через модули гроза-защиты подсоединены к общему кабелю и передают информацию (данные) через интерфейс RS-485. Нижний конец кабеля RS-485 присоединен к HOST-CONTROLLER, который, в свою очередь, осуществляет управление и обмен данными с сенсорами и 3G модемом. 3G модем реализует обмен данными с WEB-PORTAL SERVER через мобильный интернет.

WEB-PORTAL SERVER осуществляет хранение данных сенсоров, полученных через интернет от 3G модема. Прикладное программное обеспечение Сервера обрабатывает массив данных сенсоров и реализует интерфейс пользователя отображения информации. Пользователь получает доступ к Серверу через интернет на рабочую станцию (фиг.1).







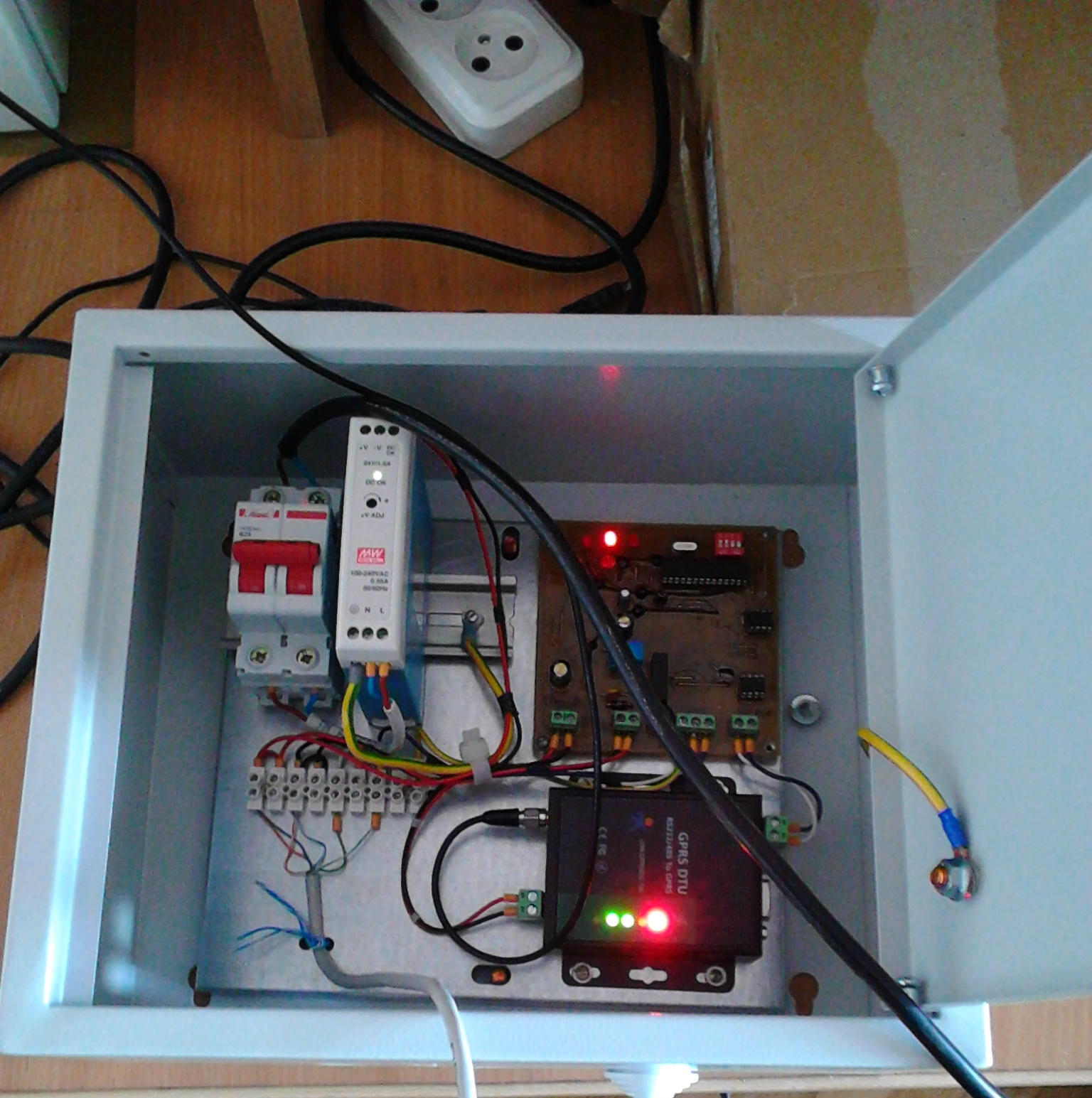




WORK STATION

INTERNET



  3G-MODEM

HOST CONTROLLER



WEB-PORTAL SERVER

3G

**Fig.1**

1. ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ

Окно главного интерфейса пользователя показано на фиг.2.

http://syscom.md/tower/images/phones.png http://syscom.md/tower/images/disp.png http://syscom.md/tower/images/tools.png

**DATA DIRECTORIES TRAFFIC SUPERINTENDENT ADMINISTRATION**

Data directory editing Alarms Configurations

Track Viewer

http://syscom.md/tower/images/statistics.png http://syscom.md/tower/images/web.png

**STATISTICS USER INTERFACE LANGUAGES**

Chart Romana English

Verticalit*y*  Русский

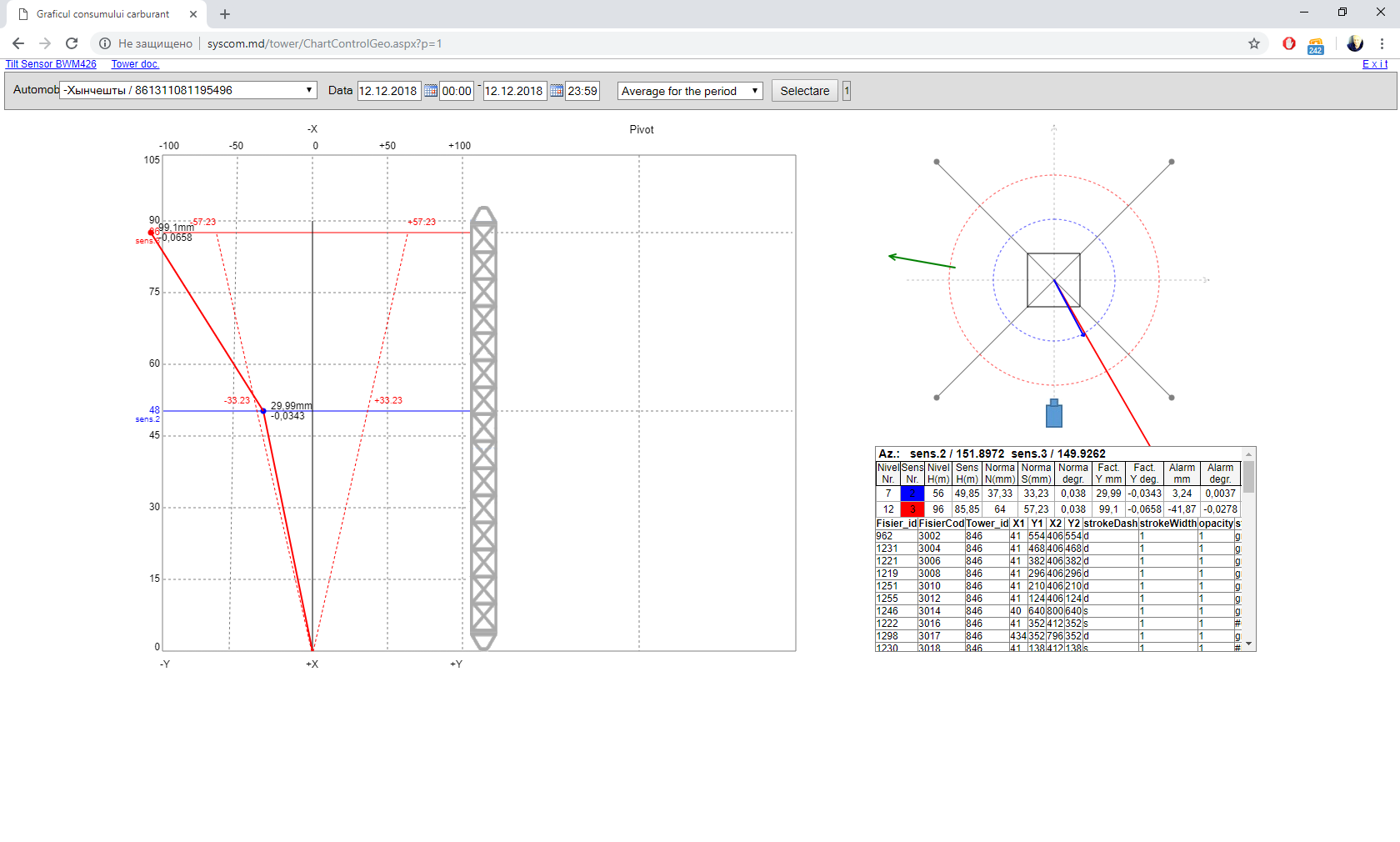
**Fig.2**

Основные функции Системы это **STATISTICS-** Chart и **STATISTICS-** Verticalit*y.*

**STATISTICS-** Chart показывает колебания мачты в реальном времени с интервалом 50 миллисекунд (Fig.3).



**Fig.3**

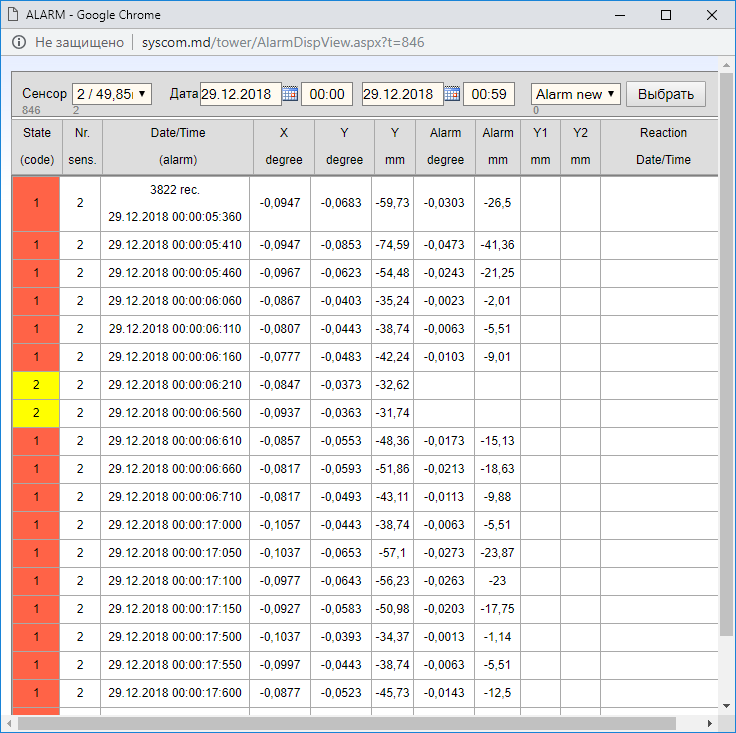
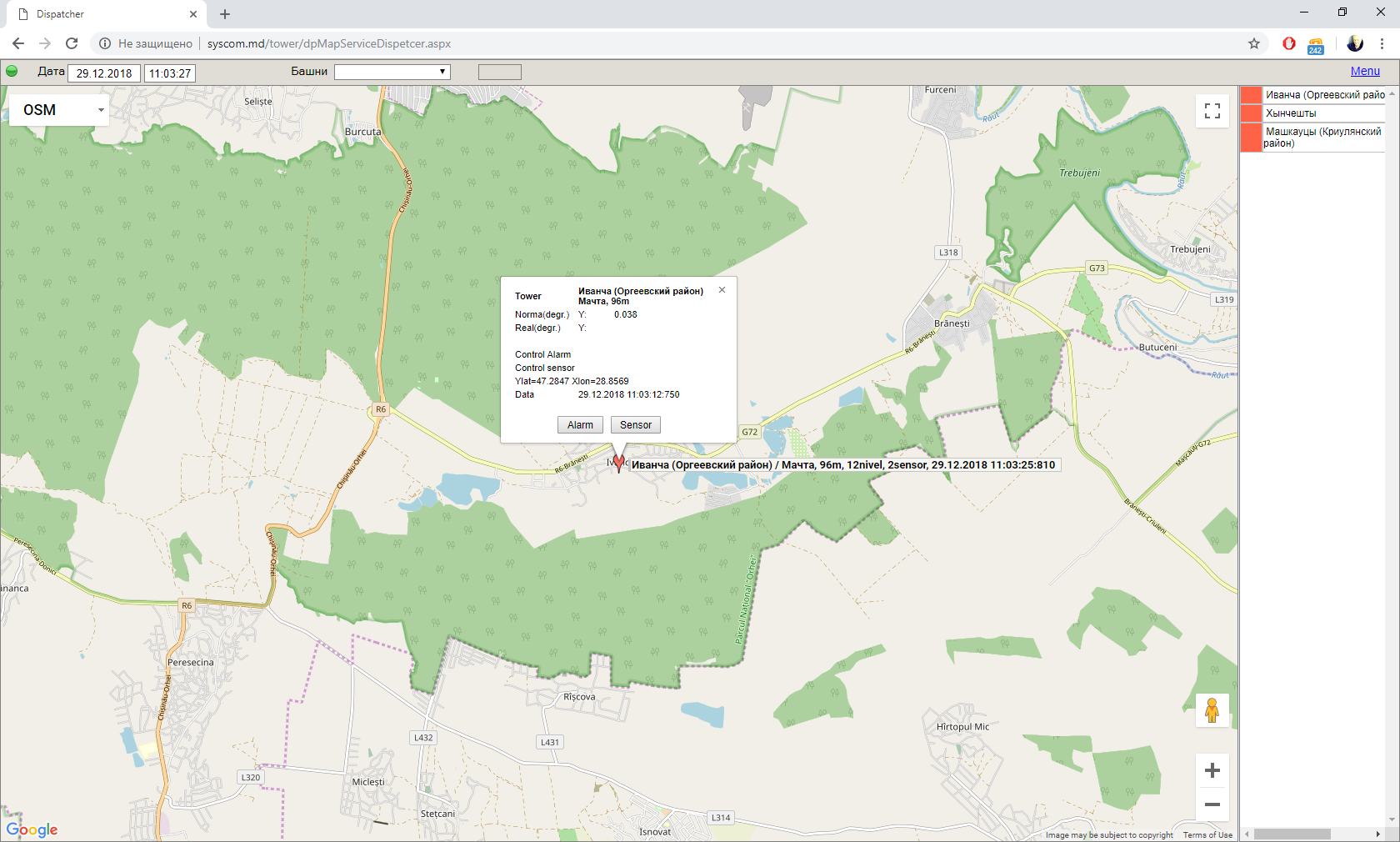
На Fig.3 показан график колебаний во время землетрясения 28 октября 2018 года (Хынчешть, Молдова, время 3часа 39 мин 27 сек., эпицентр Вранча, Румыния).

**Fig.4**

Слева показана мачта, уровни расположения сенсоров (красная горизонтальная линия и синяя горизонтальная линия). Пунктирными линиями ограничен допустимый угол отклонения мачты, а сплошными наклонными- наклон мачты на двух уровнях расположения сенсоров, совпадающими с уровнями крепления регулирующих растяжек. Из Fig.4 видно, что верхняя часть мачты выходит за пределы допустимого отклонения и нуждается в выпрямлении.

Справа показан вид сверху на мачту и показана амплитуда векторов наклона и направление (азимут) вектора наклона мачты. Синяя окружность и красная окружность показывают допустимые границы отклонений соответственно для нижнего и верхнего сенсоров. Таблица показывает вычисленные количественные параметры.

На **Fig.5 a, b** показана аварийная сигнализация в случае превышения допустимых пределов отклонения или колебания мачты/башни (**TRAFFIC SUPERINTENDENT-**Alarms, fig.2).

**Fig.5a Fig.5b**

1. ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

В настоящее время существует множество технологий и методов измерения различных параметров при изготовлении, строительстве и эксплуатации высотных конструкций, в частности мачт и башен [1,2].

Основными параметрами, подлежащие измерению при эксплуатации металлических мачт и башен являются динамические параметры и параметры устойчивости [1].

* 1. Mодель

В качестве примера рассмотрим измерение наклона (вертикальности) мачты 2-хосевым инклинометром (Fig. 6.).

Axis +z



Angle +X

Axis + y¹

Axis +x¹

Angle +Y

**Fig.6**

На Fig.6 стрелками показаны углы поворота сенсора (X, Y), а оси (x, y) представляют собой систему прямоугольных координат, согласованной по направлениям с углами поворота и жестко привязанной вместе с сенсором к мачте (Fig. 6,7). Определим систему координат **x, y, z** (Fig. 7a, Fig.7b) как нормальную систему координат мачты-сенсора, причем **x,y,z** образуют правую тройку [3], ось **x¹** параллельна **x** а ось **y** параллельна **y¹**, но противоположна по направлению. Ось **z** едина.

**z**

**B x¹**

**x\* B\***

**F** **y¹**

**y\***

**Ө**

**y**

**O x**

**Fig.7a**

**z**

**B**

**C x¹**

**φ**

**A 90° a y¹ R**

**V** Vz

**b** **Ө**

**C y**

Vx **O** **x**

**φ**

**С´** Vy

**Fig.7b**

Если сравнить координаты Fig.6 с координатами Fig.7, то видно, что на Fig.6 координаты сенсора x,y,z образуют правую тройку, если знак оси y поменять на инверсный (y=-y¹). Это необходимо учитывать при дальнейших вычислениях.

На Fig.7a показана модель мачты при наклоне в 2-х положениях: 1) вертикальном- ОB и с наклоном- ОC. Сенсор расположен перпендикулярно вертикальной оси мачты. Угол F является вектором угла наклона сенсора, а угол G является вектором угла наклона мачты. Из Fig.7a видно, что угол F равен углу G, как углы со взаимно-перпендикулярными сторонами (OB перпендикулярна x¹, а OB\* перпендикулярна y\*), т.е. вектор наклона мачты равен вектору наклона сенсора в согласованных системах координат сенсора и мачты (Fig.6).

Очевидно, что при наклонах мачты с фиксированным основанием O вершина мачты B с фиксированным сенсором перемещается по сфере с радиусом равном высоте мачты OB. Это положение справедливо и для любой промежуточной точки крепления сенсора на оси OB.

Определим Вектор вертикальности **Vg,** как вектор, характеризующий наклон мачты/башни относительно ее вертикальной оси.  **Vg** можно определить в сферических координатах (Fig.7b), с вершиной в точке С и началом в точке О. Вектор наклона мачты **Vg(**φ,Ө,R), и вектор наклона сенсора **Vs**(B,a,R), очевидно связаны соотношением: **Vg (**φ,Ө,R) = **Vs**(B,a,R), причем B=180°- φ, Ө=a.

Рассмотрим общий случай наклона мачты-сенсора (Fig.7b). Движение сенсора из точки B в точку C можно представить, как векторную сумму 2-х движений: из точки B в точку A плюс движение из точки A в точку С по сфере с радиусом OA, где сферический угол BAC- прямой [3].

Здесь A, B, C представляют собой сферические углы, а буквы a, b, c – противолежащие соответствующие дуги [3].

По формулам сферической тригонометрии [3]:

a=arccos (cos b× cos c) (1)

B=arctg (tg b/sin c). (2)

a- амплитуда угла отклонения оси ОB (угол Ө или Altitude [4]);

B-амплитуда угла направления отклонения относительно плоскости x**, z** или Azimuth [4]**.**

На практике, при малых углах отклонения, а также при большом радиусе R=OB (по сравнению с углом в радианах), можно считать треугольник АВС планарным и прямоугольным в нормальной системе координат x,y,z (или x¹, y¹,z), где угол A прямой [3], а tgb=b, sinc=c. Тогда формулы (1), (2) приобретают вид:

a= √(c²+b²) (3)

B=arctg (b/c) (4)

* 1. Динамика **(STATISTICS-** Chart)

На **Fig.3** показана динамика колебаний при землетрясении. Справа наверху показано направление колебаний мачты в момент времени 03час. 39мин. 27сек. 300мсек.

Средняя линия (Average на **Fig.3)** Вычисляется по формуле:

, (5)

Где-среднее значение выборки из **n** значений,

- амплитуда **k**-выборки.

Учитывая, что мачта фактически находится в состоянии постоянного колебания относительно некоторой наклонной оси, то среднее значение будем считать вектором постоянного наклона мачты относительно вертикали или Вектором Вертикальности.

* 1. Вертикальность **(STATISTICS-** Verticalit*y)*

Вычисление Вертикальности производится для каждого сенсора, расположенного на мачте/башне. На Fig.4 приведен пример мачты с 2-мя установленными сенсорами в местах крепления растяжек.

Вектор вертикальности вычисляется:

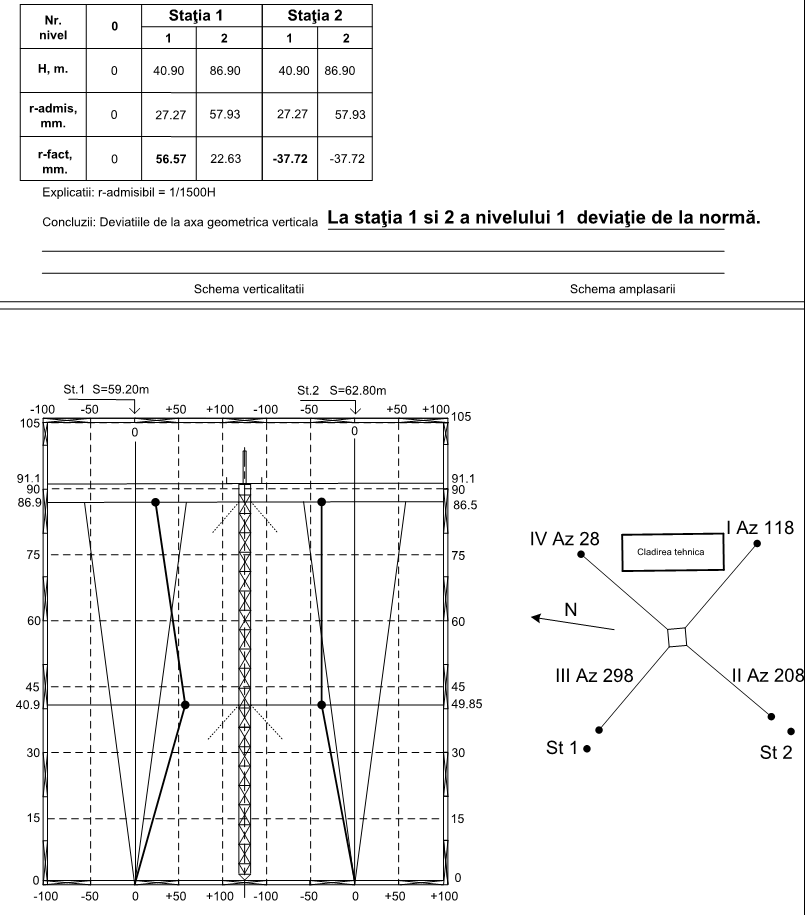
1. Для постоянного наклона по формуле (5)-Fig.4, Average for the period,
2. Для максимального отклонения при вибрациях- Maximum for the period,
3. Для конкретного времени, например, при землетрясении - Selected time.
   1. Коррекция (**ADMINISTRATION –** Configurations)

При установке сенсора на мачте/башне практически всегда существует собственный наклон сенсора относительно мачты/башни, поэтому показания сенсора в этом случае содержат информацию о суммарном наклоне- сенсора относительно мачты/башни и собственно мачты башни относительно вертикали. Для определения вертикальности самой мачты/башни необходимо из суммарных показаний сенсора вычесть наклон сенсора относительно мачты/башни или определить постоянную коррекцию (поправку) к суммарным данным сенсора. Это можно сделать 2-мя основными способами:

1. Выпрямить вертикально мачту/башню и снять показания датчика. Эти показания будут соответствовать наклону сенсора относительно мачты и в дальнейшем будут служить постоянными поправками. Однако на практике, особенно при установке системы, этот метод неудобный, т.к. выравнивание мачты/башни по вертикали является сложной и дорогостоящей процедурой, а мачта/башня на этот момент может еще не превышать допустимый предел вертикальности.
2. Измерить актуальное положение (наклон) мачты/башни геодезическим методом и одновременно снять показания установленного сенсора. Вычесть из показаний сенсора измеренные геодезическим методом приведенные показания вертикальности мачты/башни и принять результат за постоянные поправки. Этот метод требует только однажды проведение геодезических измерений мачты/башни, а после вычисления поправки позволяет использовать показания сенсора в реальном времени для определения истинного наклона мачты/башни и выравнивание последней при помощи этих показаний (Fig.3, Fig.4).

Рассмотрим пример приведения данных геодезических измерений в угловые показания сенсора и вычисления поправки.

На Fig.8 показан пример геодезических измерений с изображением схемы вертикальности для мачты.



**Fig.8**

Как видно из Fig.8 геодезические измерения вертикальности произведены с двух взаимно-перпендикулярных направлений (осей): St1 и St 2. Определим систему координат St1, St2, z как Геодезическую (x\*, y\*, Fig.9). На Fig.8 показан допустимый угол наклона от вертикальности и результаты измерений на двух уровнях расположения растяжек (40,9м и 86,9м) – допустимое и реальное линейное отклонение (мм) на обеих уровнях и с обеих направлениях St1 и St2. Сенсоры установлены на уровнях растяжек- (40,9м и 86,9м) соответственно. Сенсоры расположены по направлению (азимуту) идентично. На Fig.9 показан вид сверху мачты (пример), которая представляет собой квадрат с сенсором, расположенным в центре.

**+y=-y¹**

**+y\***

**+X**

**G**

**O¹**

**Ө\***

**O\***

+**x**

**ΔO**

**Q**

**O**

**+Y**

**+x\***

St 1 St 2

**Fig.9**

Определим нормальную (базовую) систему координат: оси координат сенсора и мачты – x,y; углы сенсора- X,Y (Fig.6); оси координат геодезических измерений – x\*,y\* (Fig.8). Вектор **O-O¹** или просто **O¹** представляет собой вектор вертикальности сенсора, а **O\***- вектор вертикальности мачты, полученный в результате независимых геодезических измерений. Вектор **ΔO** представляет собой вектор вертикальности сенсора относительно мачты, который будем считать определенным в момент установки сенсора и неизменным в дальнейшем.

Из Fig.9 очевидно: **O¹= O\*+ ΔO,** или:

**ΔO= O¹- O\*, (6)**

Т.е. **Для определения вектора постоянной поправки показаний сенсора необходимо из вектора показаний сенсора в определенный момент времени вычесть вектор геодезических измерений наклона мачты в этот же момент времени**.

Пусть значения векторов **ΔO, O¹, O\*** в момент времени τ равны соответственно

**ΔO(**τ**), O¹(**τ**), O\*(**τ**).** Тогда, откорректированные показания сенсора в произвольный момент времени t:

**O¹c(t)= O¹(t)- [O¹(τ)- O\*(τ)] = O¹(t)-ΔO**  **(7)**

Здесь

**O¹c(t) –** откорректированные показания сенсора,

**O¹(t) –** текущие показания сенсора в момент времени t,

**O¹(τ), O\*(τ) -** значения соответствующих векторов в момент **τ** проведения геодезических измерений**.**

Поскольку в нашем примере сенсор угловой, 2-х осевой, то и вектор поправки необходимо определить в 2-хосевых угловых координатах (X,Y Fig.9). Из Fig.9 видно, что в общем случае геодезическая система координат (x\*,y\*,z) не совпадает с нормальной сферической системой координат (x,y,z), а повернута в горизонтальной плоскости на угол **G.** Для совместимости произведем поворот геодезической системы координат на угол Gи определим геодезические координаты в нормальной сферической системе:

**x\*ₒ = x\* cosG + y\* sinG, (8)**

**y\*ₒ =- x\* sinG + y\* cosG, (9)**

где **x\*ₒ , y\*ₒ** геодезические координаты в нормальной системе координат x, y.

Теперь необходимо преобразовать линейные координаты **x\*ₒ , y\*ₒ** в угловые X\*, Y\*.

По формулам преобразования координат из декартовой системы в сферическую (Fig.7b), [6] имеем:

V=+y\*ₒ²+z\*ₒ²) (10)

Ө=arccos()=arctg[] (11)

φ = arctg (12)

z\*ₒ=H и представляет собой высоту проведения геодезических измерений (Tab. Fig.8).

Из формул (10-12) найдем поправки геодезических измерений в углы сенсора X,Y.

Пользуясь свойством ортогональности, найдем поочередно поправки Xc, Yc.

В формулах (10-12) для нахождения Xc примем y\*ₒ=0:

V=+H²) (13)

Өx=arccos()=arctg[] (14)

φ = arctg=0 (15)

Отсюда следует:

Өx= arctg, (16)

аналогично

Өy= arctg (17)

С учетом угла поворота систем координат на угол G (8,9), подставляя в (16,17), получим выражения для угловых поправок:

X\*c= Өx= arctg

Y\*c= Өy= arctg

Учтем для сенсора преобразование y=-y¹ (Fig.6), тогда получим окончательно выражения для коррекций в углах сенсора:

X¹\*c= arctg (18)

Y¹\*c= arctg (19)

Пример показаний сенсоров в момент проведения геодезических измерений Time (Tab.1, Fig.8,9):

Tab.1. Показания сенсоров

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Sensor**  **Nr.** | **Hs**  **м** | **Date/Time** | **X**  **deg** | **Y**  **deg** | **Amplitude**  **deg** | **Azimuth**  **deg** |
| 2 | 49,85 | 19.07.2018 02:19:32:410 | 1,1890 | 0,3540 | 1,2406 | 16,5798 |
| 3 | 86,85 | 19.07.2018 02:17:47:293 | -1,1390 | 0,2220 | 1,1604 | -11,0291 |

Для нашего примера (Fig.8,9): G=45°, следовательно, формулы (18), (19):

X¹\*c= arctg 0,707 ,

Y¹\*c= arctg.

Подставляя данные из Fig.8, Tab.1, для сенсора №3 получим:

X¹\*c(3) = arctg=-0,007°

Y¹\*c(3)= arctg= 0,028°

Учитывая показания сенсора в момент проведения геодезических измерений (Tab.1), получим окончательные поправки:

Δ X¹\*c(3)= -1,1390°-(-0,007°)=-1,132°

Δ Y¹\*c(3)= 0,2220- 0,028= 0,194°

1. **Заключение**

Современные технологические достижения в области электроники и системотехники, такие как MEMS, мобильный интернет, облачные вычисления, SCADA и т. д., позволяют разрабатывать и внедрять эффективные системы мониторинга геодезических параметров мачт / вышек. Для эффективного ввода в эксплуатацию таких систем необходимо использовать традиционные геодезические методы для первоначального выравнивания высокоточных датчиков при установке на мачте / вышке. Разработанная система мониторинга показала свою эффективность в эксплуатации. Разработанный математический аппарат и программное обеспечение могут быть использованы для построения автоматизированных систем контроля геодезических параметров высотных сооружений.

**Источники**

[1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microelectromechanical_systems>

[2] <https://www.yokogawa.com/us/library/resources/application-notes/scada-cloud-computing/>

[3] Шеховцев Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография; Нижегород. Гос. Архит.-строит. Университет- Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. -156с.

[4] TIA STANDARD. Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas, 2005.

[5] Шакирзянов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Ш17 Динамика и устойчивость сооружений: Учебное пособие. − 2-е перераб. изд. / Р.А. Шакирзянов, Ф.Р. Шакирзянов. − Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2015. − 120 с.

[6] <https://csengineermag.com/article/surveying-a-towers-movements/>

[7] P. Kranz. SPHÄRISHE TRIGONOMETRIE. Сферическая тригонометрия. Пер. с нем./Под ред. Я.Н. Шпильрейна. М:ЛКИ, 2007.-96с.

[8] <http://angem.ru/analiticheskaya_geometriya/?lesson=4&id=13>

[9] <http://www.programmersforum.ru/showthread.php?t=97522>