

УДК 629.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771352018143830>

Скрипковська М. Г.¹, студентка, Черняк М. Г.², к.т.н., доцент,
Добролюбова М. В. З, к.т.н., доцент

РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ НАХИЛУ НЕРУХОМОГО ОБ'ЄКТУ ВІД ПЛОЩИНИ ГОРИЗОНТУ

En The need to measure the angles of inclination is essential for many branches of technology and industry. At the current Ukrainian market of devices there are no domestic accelerometer devices for measuring roll and pitch angles (DMRPA), which would meet the following requirements: the mean square error less than one angular minute in the range of angles $\pm 10^\circ$, the operating temperature range $-40 \dots +70^\circ \text{C}$, output information in a digital code with a discreteness of 1 angular second. Such DMRPAs are needed to control the position of radars and antennas, horizontals of platforms and vehicles.

The developed microprocessor system for measuring the inclination angles of an object relative to the horizon plane (MSMIA) provides measurements of the roll and pitch angles in accordance with the above requirements. Issuance of output digital data for consumer is carried out on the interface RS-422.

The MSMIA's metal rectangular case consists of a bottom base plate having three legs for attachment to the object base surface and a casing. On the base plate two accelerometer sensors (AS) – primary accelerators transducer, with mutually perpendicular measuring axes, are installed. Digital temperature transducers are installed near them. The analogue parts of the device electronic circuit board contain the electronics for the transformation of the pendulum sensitive elements

¹ НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», факультет авіаційних і космічних систем

² НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра аерокосмічних і роботизованих систем

³ НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації експериментальних досліджень

displacement into the voltage, and electronics of the feedback regulators, the current from which goes to the coil of the reverse compensating converter. This current is proportional to the projection of gravity accelerating on the sensitivity axis of the AS, and is converted into a voltage across the precision resistor. The microcontroller located on the board includes two high precision analogue-digital converters, converting signals from these resistors into digital codes, proportional to measured acceleration. The microcontroller software performs algorithmic compensation for the measurement errors of the acceleration and the calculation of the roll and pitch angles. During the experimental tests, it has been confirmed that for various combinations of temperatures with range $-40 \dots +70^\circ C$ and angles of inclination in the range of $\pm 10^\circ$, the mean square error is not more than one angular minute, which is unique for the devices presented on the modern domestic market.

Consequently, this development will allow Ukraine to establish the production of high-precision MSMIAs to meet the needs of domestic new technical manufacturers. Further research can be directed to the study of long-term instability of the MSMIA's parameters, the reduction of the mean-square error due to the installation of additional temperature sensors and the improvement of temperature errors compensation.

Ru Представлены основные результаты, полученные во время разработки, изготовления и экспериментальных исследований микропроцессорной системы измерения углов наклона неподвижного объекта от плоскости горизонта. Используются алгоритмы коррекции с применением кусочно-линейной аппроксимации. Разработана и записана в память микроконтроллера программа сбора, обработки и передачи данных на ПК. Разработано программное обеспечение для разработчика и для пользователя системы.

Вступ

Вимірювання кутів нахилу об'єктів відносно площини місцевого горизонту є потребою у багатьох галузях техніки, промисловості, будівництва.

До таких об'єктів можна віднести свердловини, для яких визначаються кут і азимут викривлення і контролюється їх просторове положення; будівельні крани та землерийні машини, для яких контролюються робочий і залишковий прогини стріли, безпечний кут нахилу крана в цілому, а також для контролю вимірюється навантаження на стрілу; опори мостів, архітектурні споруди, різноманітні платформи, радары, телескопи та трубопроводи, для яких контролюється їх стан; транспортні магістралі, для яких безпосередньо вимірюються їх кути

нахилу із рухомого транспортного засобу; кузови автомобілів, для яких контролюється кут нахилу у протиугінних системах тощо [1].

Точність вимірювання, позиціонування та утримання певного положення елементів їх конструкцій під час створення чи експлуатації безпосередньо впливають на якість виконання покладених на них функцій.

Постановка задачі

Станом на теперішній час на ринку продукції приладобудівної галузі України відсутні вітчизняні двовісні цифрові акселерометричні пристрої вимірювання кутів крену та тангажу (ПВКТ), які б відповідали наступним вимогам:

- абсолютна похибка менше однієї кутової мінути у діапазоні кутів $\pm 10^\circ$ у робочому діапазоні температур $-40 \dots +70^\circ \text{C}$;
- видача інформації у цифровому коді із дискретністю 1 кутова секунда.

Мета статті – надати основні результати, отриманні під час розробки мікропроцесорної системи вимірювання кутів нахилу нерухомого об'єкту від площини горизонту (МСВКН), яка відповідає вищезгаданим вимогам, у тому числі під час розробці алгоритмів корекції та проведенні експериментальних досліджень.

Основна частина

Структура МСВКН

Проведений порівняльний аналіз інклінометрів із наближеними до згаданих вимог характеристиками та різними типами первинних перетворювачів показав, що найближчими аналогами МСВКН можна вважати високоточні цифрові двовісні інклінометри із акселерометричними первинними перетворювачами [2]. Тому до уваги не приймалися широко відомі рідинні інклінометри, оскільки через значний час встановлення вихідного сигналу, їх точність суттєво знижується за низьких температур, та одновісні інклінометри через ряд переваг двовісних (стабільність і точність взаємного положення вісей чутливості каналів крену та тангажу, спрощене підключення, цінова політика тощо).

У технічних описах пристроїв виробники вказують або абсолютну похибку у всьому температурному діапазоні, або абсолютну похибку за нормальних умов та значення температурних коефіцієнтів. У такому випадку, розрахувати абсолютну похибку у всьому температурному діапазоні можна за формулою:

$$\Delta = \Delta_{n.c.} + b\Delta_t + \delta_{sf}\Delta_t\varphi, \quad (1)$$

де $\Delta_{n.c.}$ – абсолютна похибка за нормальних умов,

b – температурний коефіцієнт зміщення нуля,

Δ_t – діапазон температур (від «кімнатної» 20°C до 70°C),

δ_{sf} – температурний коефіцієнт масштабного коефіцієнта,

φ – максимальний вимірюваний кут.

Порівняльні характеристики розглянутих інклінометрів наведені у табл. 1.

Порівняння величин абсолютних похибок у діапазоні робочих температур дозволило зробити висновок, що пристрої з компенсаційними первинними перетворювачами є більш точними, тому МСВКН була створена на основі компенсаційних акселерометрів.

Розроблена МСВКН, зображена на рис. 1, забезпечує вимірювання величини кутів крену γ і тангажу θ відхилення від площини місцевого горизонту у діапазоні кутів $\pm 10^\circ$ у робочому діапазоні температур $-40\dots+70^\circ\text{C}$. Для цього її необхідно встановити та закріпити на базовій поверхні об'єкту. Відповідні вихідні цифрові електричні сигнали видаються споживачу по інтерфейсу RS-422 із гальванічною розв'язкою.

Таблиця 1.

Порівняльна таблиця аналогічних технічних

Інклінометр (виробник)				
	<i>DSIC-2</i> (<i>Sherborne Sensors</i> , США) [3]	<i>DXI-200</i> (<i>Jewell Instruments</i> , США) [4]	<i>JDI-200</i> (<i>Jewell Instruments</i> , США) [5]	<i>ACA2000-10</i> , (<i>Rion</i> , Китай) [6]
Загальні характеристики				
1	2	3	4	5
Діапазон вимірювання кутів, $^\circ$	± 15	$\pm 14,5$	$\pm 14,5$	± 10
Абсолютна похибка в усьому температурному діапазоні, $^\circ$	0,08	-	-	-
Абсолютна похибка за нормальних умов, $^\circ$	-	0,05	0,02	0,005
Температурний коефіцієнт зміщення нуля, $^\circ/\text{C}$	-	0,005	$\approx 0,00145$ (100 ppm/ $^\circ\text{C}$)	$\pm 0,0008$
Температурний коефіцієнт масштабного коефіцієнта	-	0,01 % reading/ $^\circ\text{C}$	90 ppm/ $^\circ\text{C}$	≤ 50 ppm/ $^\circ\text{C}$
Розрахована абс. похибка в усьому темп. діапазоні, $^\circ$	-	0,373	0,158	0,07

Прилади та методи контролю

1	2	3	4	5
Роздільна здатність, °	0,001	0,001	0,0001	0,0005
Тип первинного перетворювача	компенсаційний акселерометр	компенсаційний акселерометр	<i>MEMS</i> -акселерометр (некомпенсаційний)	компенсаційний акселерометр
Вихідний сигнал				
Інтерфейс	<i>RS485</i>	<i>RS422</i>	<i>RS-485</i>	<i>RS422</i>
Електричні характеристики				
Напруга живлення, В	18...36	10...30	9...36	9...15
Навколишнє середовище				
Температурний діапазон, °С	-40...+80	-40...+85	-40...+85	-40...+85

Металевий прямокутний корпус складається із нижньої базової пластини, що має три лапи для високоточного кріплення до базової поверхні об'єкту, та металевого кожуха. Через роз'єм *PC19TB* здійснюється живлення пристрою, видача вихідних сигналів та програмування пристрою через контакти програматора *J-Link* для доступу до флеш-пам'яті.



Рис. 1. Пристрій вимірювання кутів нахилу крену та тангажу

На базовій пластині встановлені два первинні перетворювачі прискорення – акселерометричні чутливі вузли (АЧВ). Вимірювальні осі АЧВ є взаємно перпендикулярними. Біля магнітних систем акселерометрів встановлені термодатчики. Над АЧВ розміщена електронна плата.

Структурна схема *МСВКН* зображена на рис. 2.

Аналогові вимірювальні перетворювачі забезпечують роботу первинних перетворювачів прискорення, а саме: містять електроніку перетворення переміщення маятникових чутливих елементів у напругу та електроніку регуляторів зворотного зв'язку, струм з яких йде до обмотки зворотного компенсаційного перетворювача. Цей струм пропорційний проекції прискорення вільного падіння на вісь чутливості АЧВ і перетворюється у напругу за допомогою прецизійного резистора.

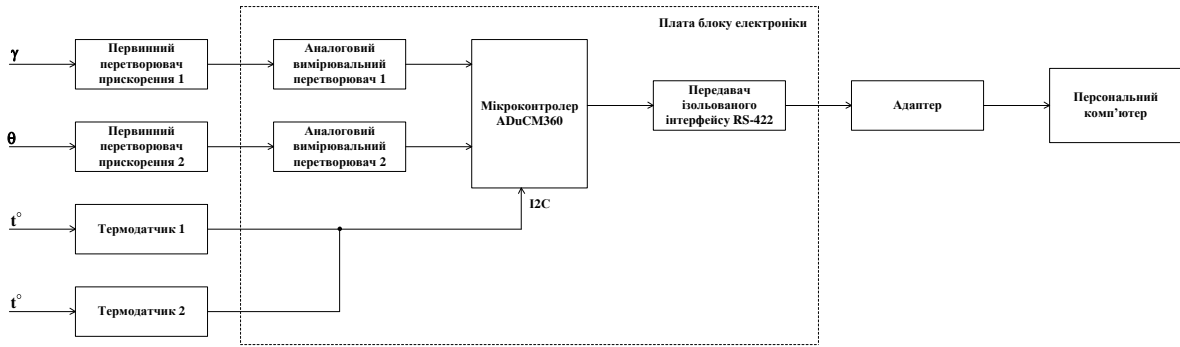


Рис. 2. Структурна схема МСВКН

Розташований на платі мікроконтролер *ADuCM360* включає в себе два високоточні сігма-дельта аналого-цифрових перетворювача (АЦП) [7], що перетворюють сигнали із цих резисторів у цифрові коди, які пропорційні вимірюваному прискоренню.

Термодатчики підключені до мікроконтролера за допомогою послідовної шини даних *I2C*.

Програмне забезпечення мікроконтролера виконує алгоритмічну компенсацію похибок вимірювання прискорення і розрахунок кутів крену та тангажу.

Джерела похибок МСВКН

Розрахунок інструментальних похибок проводився у відповідності до структурної моделі каналів тангажу та крену МСВКН із джерелами похибок, наведеної на рис. 3. Тому канали вимірювання крену та тангажу МСВКН мають аналогічні джерела похибок.

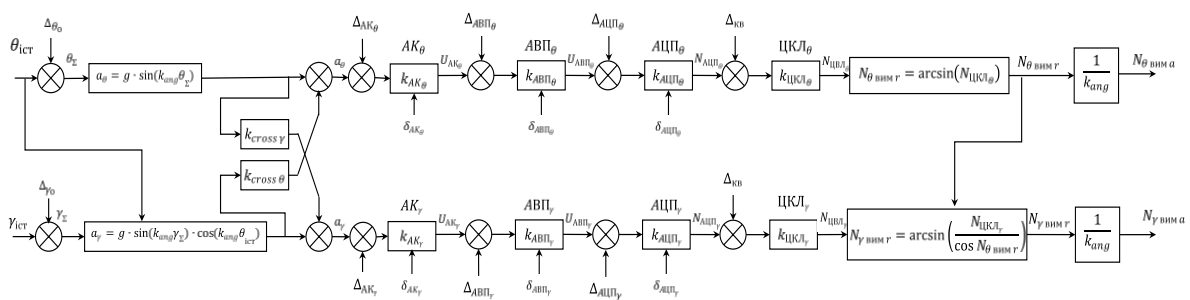


Рис. 3. Структурна модель МСВКН із джерелами похибок

На моделі позначено:

γ_{ICT} , [arcsec] – вимірюваний кут крену;

θ_{ICT} , [arcsec] – вимірюваний кут тангажу;

$k_{\text{ang}} = \frac{\pi}{180 \cdot 3600}$ – коефіцієнт перетворення величини кута у кутових секундах у радіани;

П р и л а д и т а м е т о д и к о н т р о л ю

AK_{γ} , AK_{θ} – акселерометри;

Δ_{γ_0} , Δ_{θ_0} , [arcsec] – абсолютні систематичні адитивні похибки початкових кутів відхилення вимірювальних осей AK_{γ} , AK_{θ} від базової площини МСВКН;

g , [м/с²] – прискорення вільного падіння;

$k_{cross\gamma}$, $k_{cross\theta}$, [1] – коефіцієнти перехресного зв'язку для каналів крену і тангажу;

α_{γ} , α_{θ} , [м/с²] – проекції прискорення на вісі чутливості AK_{γ} , AK_{θ} ;

$\Delta_{AK_{\gamma}}$, $\Delta_{AK_{\theta}}$, [м/с²] – зміщення нуля AK_{γ} , AK_{θ} (абсолютна систематична адитивна похибка);

$k_{AK_{\gamma}}$, $k_{AK_{\theta}}$, [В/г] – коефіцієнти перетворення AK_{γ} , AK_{θ} ;

$\delta_{AK_{\gamma}}$, $\delta_{AK_{\theta}}$, [1] – відносні мультиплікативні похибки коефіцієнтів перетворення AK_{γ} , AK_{θ} (систематичні);

$U_{AK_{\gamma}}$, $U_{AK_{\theta}}$, [В] – вихідна напруга AK_{γ} , AK_{θ} ; $ABП_{\gamma}$, $ABП_{\theta}$, [В] – аналогові вимірювальні перетворювачі;

$\Delta_{ABП_{\gamma}}$, $\Delta_{ABП_{\theta}}$, [В] – зміщення нуля $ABП_{\gamma}$, $ABП_{\theta}$;

$k_{ABП_{\gamma}}$, $k_{ABП_{\theta}}$, [1] – коефіцієнти перетворення $ABП_{\gamma}$, $ABП_{\theta}$;

$\delta_{ABП_{\gamma}}$, $\delta_{ABП_{\theta}}$, [1] – мультиплікативні похибки коефіцієнтів перетворення $ABП_{\gamma}$, $ABП_{\theta}$;

$U_{ABП_{\gamma}}$, $U_{ABП_{\theta}}$, [В] – вихідна напруга $ABП_{\gamma}$, $ABП_{\theta}$; $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$ – аналогово-цифрові перетворювачі;

$\Delta_{AЦП_{\gamma}}$, $\Delta_{AЦП_{\theta}}$, [В] – зміщення нуля $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$;

$k_{AЦП_{\gamma}}$, $k_{AЦП_{\theta}}$, [1/В] – коефіцієнти перетворення $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$;

$\delta_{AЦП_{\gamma}}$, $\delta_{AЦП_{\theta}}$, [1] – мультиплікативні похибки коефіцієнтів перетворення $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$;

$N_{AЦП_{\gamma}}$, $N_{AЦП_{\theta}}$, [1] – вихідний цифровий код $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$;

$\Delta_{кв_{\gamma}}$, $\Delta_{кв_{\theta}}$, [1] – похибки квантування $AЦП_{\gamma}$, $AЦП_{\theta}$;

$ЦКЛ_{\gamma}$, $ЦКЛ_{\theta}$ – цифрові коригувальні ланки;

$k_{ЦКЛ_{\gamma}}$, $k_{ЦКЛ_{\theta}}$, [1] – коефіцієнти перетворення $ЦКЛ_{\gamma}$, $ЦКЛ_{\theta}$;

$N_{ЦКЛ_{\gamma}}$, $N_{ЦКЛ_{\theta}}$, [1] – вихідні цифрові коди $ЦКЛ_{\gamma}$, $ЦКЛ_{\theta}$;

$N_{\gamma \text{ вим } r}$, $N_{\theta \text{ вим } r}$, [1] – цифрові коди, що чисельно дорівнюють вимірним кутам у розмірності радіан;

$N_{\gamma \text{ вим } \alpha}$, $N_{\theta \text{ вим } \alpha}$, [1] – вихідні цифрові коди, які передаються за допомогою інтерфейсу RS-422, чисельно рівні вимірним кутам у розмірності кутових секунд.

За відсутності похибок та перехресних зв'язків рівняння вимірювання МСВКН має вигляд:

$$N_{\theta} = \frac{1}{k_{ang}} \arcsin \left(g \cdot \sin(\theta \cdot k_{ang}) \cdot k_{AK_{\theta}} \cdot k_{ABП_{\theta}} \cdot k_{AЦП_{\theta}} \cdot k_{ЦКЛ_{\theta}} \right), [\text{arcsec}] \quad (2)$$

$$N_{\gamma} = \frac{1}{k_{ang}} \times \arcsin \left(\frac{g \cdot \sin(\gamma \cdot k_{ang}) \cdot \cos(\theta_{icm} \cdot k_{ang}) \cdot k_{AK_{\gamma}} \cdot k_{ABП_{\gamma}} \cdot k_{AЦП_{\gamma}} \cdot k_{ЦКЛ_{\gamma}}}{\cos(N_{\theta \text{ вим } r})} \right), [\text{arcsec}] \quad (3)$$

де N_{θ} , N_{γ} – вихідний код за відсутності похибок.

За відсутності похибок та у разі виконання умов

$$k_{ЦКЛ_{\theta}} = \frac{1}{g \cdot k_{AK_{\theta}} \cdot k_{ABП_{\theta}} \cdot k_{AЦП_{\theta}}}, \quad (4)$$

$$k_{ЦКЛ_{\gamma}} = \frac{1}{g \cdot k_{AK_{\gamma}} \cdot k_{ABП_{\gamma}} \cdot k_{AЦП_{\gamma}}}, \quad (5)$$

виконується рівність:

$$\frac{\cos(\theta_{icm} \cdot k_{ang})}{\cos(N_{\theta \text{ вим } r})} = 1, \quad (6)$$

тому вираз (2) можна спростити:

$$N_{\gamma} = \frac{1}{k_{ang}} \arcsin \left(g \cdot \sin(\gamma \cdot k_{ang}) \cdot k_{AK_{\gamma}} \cdot k_{ABП_{\gamma}} \cdot k_{AЦП_{\gamma}} \cdot k_{ЦКЛ_{\gamma}} \right), [\text{arcsec}]. \quad (7)$$

Після спрощення рівнянь за виконанням умов отримуємо $N_{\theta} = \theta$ $N_{\gamma} = \gamma$, тобто вихідний код за відсутності похибок чисельно дорівнює істинному вимірюваному куту у розмірності кутової секунди.

Рівняння вимірювання каналів крену та тангажу і за наявності похибок є подібними, що дозволяє перейти до розгляду узагальненого каналу вимірювання із вхідним кутом β . Структурна модель узагальненого каналу МСВКН із джерелами похибок зображена на рис. 4.

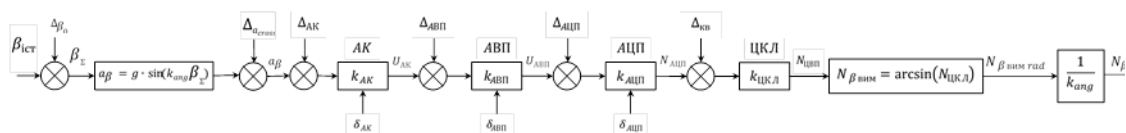


Рис. 4. Структурна модель узагальненого каналу МСВКН із джерелами похибок

На рис. 4 позначено: $\Delta_{\alpha_{cross}}$ – адитивна похибка, викликана наявністю перехресного зв'язку; $N_{\beta_{вим} rad}$, [1] – код, що чисельно дорівнює виміряному куту у розмірності радіан; $N_{\beta_{вим} \alpha}$, [1] – вихідний код, чисельно рівний виміряному куту у розмірності кутових секунд.

Інші, прийняті на рис. 4 позначення, тотожні позначенням на рис. 3, індекси θ та γ у даному випадку відсутні.

Обчислені мультиплікативні похибки АК, АВП, АЦП зведені у табл. 2, адитивні – у табл. 3 [8, 10].

Таблиця 2.

Мультиплікативні похибки

	АК	АВП	АЦП
20°C	$\delta_{AK} = \pm 0,01\%$	$\delta_{AVP} = \pm 0,2\%$	$\delta_{ACP} = \pm 0,025\%$
-40°C	$\delta_{AK t^\circ} = \pm 1,2\%$	$\delta_{AVP t^\circ} = \pm 0,3\%$	$\delta_{ACP t^\circ} = \pm 0,018\%$

Таблиця 3.

Адитивні похибки

	Δ_{β_0}	$\Delta_{\alpha_{cross}}$	АК	АВП	АЦП	Квантування
20°C	$\pm 10^{-3} rad$	$\pm g \cdot 4,9 \cdot 10^{-3}$	$\Delta_{AK} =$ $= \pm 5 \cdot 10^{-3} g$	$\Delta_{AVP} =$ $= \pm 3,5 \cdot 10^{-3} V$	$\Delta_{ACP} =$ $= \pm 1 \cdot 10^{-4} V$	$\Delta_{KB} =$ $= \pm 3 \cdot 10^{-5}$
-40°C			$\Delta_{AK t^\circ} =$ $= 3 \cdot 10^{-3} g$	$\Delta_{AVP t^\circ} =$ $= \pm 3,2 \cdot 10^{-3} V$	$\Delta_{ACP t^\circ} =$ $= \pm 6 \cdot 10^{-5} V$	

Тоді сумарна мультиплікативна похибка на виході ЦКЛ до калібрування за 20°C дорівнює

$$\delta_{N_{ЦКЛ}} = \pm \left(|\delta_{AK}| + |\delta_{AVP}| + |\delta_{ACP}| \right) = \pm 0,23\% . \quad (8)$$

Сумарна адитивна похибка на виході ЦКЛ до калібрування при 20°C

$$\gamma_{N_{\text{ЦКЛ}}} = \pm \left(\frac{k_{\text{ang}} |\Delta_{\beta_0}|}{x_N} + \frac{|\Delta_{\alpha_{\text{cross}}}|}{x_N g} + \frac{|\Delta_{\text{AK}}|}{x_N g} + \frac{|\Delta_{\text{ABП}}|}{x_N g k_{\text{AK}}} + \frac{|\Delta_{\text{АЦП}}|}{x_N g k_{\text{AK}} k_{\text{ABП}}} + \frac{|\Delta_{\text{кв}}|}{x_N g k_{\text{AK}} k_{\text{ABП}} k_{\text{АЦП}}} \right) = \pm 0,07. \quad (9)$$

Абсолютна сумарна похибка на виході ЦКЛ до калібрування за 20 °С (основна)

$$\Delta_{\Sigma N_{\text{ЦКЛ}}} = \delta_{N_{\text{ЦКЛ}}} \cdot \sin(k_{\text{ang}} \beta_{\text{іст}}) + \Delta_{N_{\text{ЦКЛ}}} = 0,05. \quad (10)$$

Результати розрахунку доводять необхідність застосування методик підвищення точності.

Підвищення точності

Корекція здійснюється ЦКЛ (програмою процесора МК), на яку надходять цифрові коди з виходу АЦП. Константи ЦКЛ визначаються під час однократного калібрування для конкретного екземпляру МСВКН та програмується у пам'ять МК.

Калібрування МСВКН. Експериментальні дослідження проводились на стенді, що складається із закріпленої на валу оптичної ділильної головки (ОДГ) платформи із встановленою на ній МСВКН. Платформа знаходиться всередині термокамери. Таким чином із високою точністю (5 кутових секунд) задавалися кути нахилу і МСВКН витримувалась за заданої температури протягом часу, потрібного для практичного завершення температурних перехідних процесів. Вихідні сигнали – коди АЦП $N_{\text{АЦП}_\gamma}$, $N_{\text{АЦП}_\theta}$ – передавалися на ПК та автоматично реєструвалися за допомогою створеної програми для розробників.

Систему тестували за температур 20 °С, -35 °С, -5 °С, +60 °С. Температура визначалась за кодами ТД МСВКН та була близька до температури, виміряної ТД термокамери.

Під час кожного температурного режиму спочатку були задані кути крену у діапазоні кутів нахилу $\pm 10^\circ$ за 0° по тангажу, потім – тангажу у діапазоні кутів нахилу $\pm 10^\circ$ за 0° по крену.

Корекція основних адитивних та мультиплікативних систематичних похибок [9, 10]. Вихідні коди АЦП містять у собі похибки δ_{AK} , $\delta_{\text{ABП}}$, $\delta_{\text{АЦП}}$ та Δ_{β_0} , $\Delta_{\alpha_{\text{cross}}}$, $\Delta_{\text{ABП}}$, $\Delta_{\text{АЦП}}$, $\Delta_{\text{кв}}$. Наявність ЦКЛ дозволяє під час калібрування МСВКН на горизонтальній площині за температуру 20 °С налаштувати для кожного каналу такі коефіцієнти $k_{\text{ЦКЛ}}$ та такі поправки $C_{\text{ЦКЛ}}$, що виконуються наступні умови

$$k_{\text{ЦКЛ}} = \frac{1}{g \cdot k_{\text{АК}} (1 + \delta_{\text{АК}}) k_{\text{АВП}} (1 + \delta_{\text{АВП}}) k_{\text{АЦП}} (1 + \delta_{\text{АЦП}})}, \quad (11)$$

$$C_{\text{ЦКЛ}} = - \left(k_{\text{ang}} \Delta_{\beta_0} + \frac{\Delta_{\text{АК}}}{g} + \frac{\Delta_{\text{АВП}}}{g k_{\text{АК}}} + \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{g k_{\text{АК}} k_{\text{АВП}}} \right). \quad (12)$$

За виконання умов (10) та (11) теоретично залишаються не скомпенсованими лише похибки, пов'язані із перехресним зв'язком та квантуванням у АЦП. $C_{\text{ЦКЛ}}$ визначається як код із протилежним знаком за 0° нахилу та 20°C .

Для компенсації похибки, пов'язаної із перехресним зв'язком у ЦКЛ додається складова

$$C_{\text{ЦКЛ cross } \gamma} = -k_{\text{cross } \gamma} \cdot N_{\text{АЦП}_0}, \quad (13)$$

$$C_{\text{ЦКЛ cross } \theta} = -k_{\text{cross } \theta} \cdot N_{\text{АЦП}_\gamma}. \quad (14)$$

За узагальненою моделлю

$$N_{\text{ЦКЛ}} = N_{\text{АЦП}} \cdot k_{\text{ЦКЛ}}. \quad (15)$$

Якщо скомпенсувати основні систематичні адитивні похибки кодів АЦП, визначивши $C_{\text{ЦКЛ}}$ та $C_{\text{ЦКЛ cross}}$, то добуток $N_{\text{АЦП}} \cdot k_{\text{ЦКЛ}}$ має дорівнюватиме істинному (дійсному, заданому за допомогою ОДГ) значенню синуса вимірюваного кута, із похибкою, яка не перевищуватиме допустиме значення $\Delta_{\Sigma N_{\text{ЦКЛ}}}$. Таким чином, для кожного каналу за експериментальними даними можна розрахувати $k_{\text{ЦКЛ}_\gamma}$, $k_{\text{ЦКЛ}_\theta}$.

Тоді за 20°C вимірюваний кут можна знайти за формулами

$$\gamma = \arcsin \left(\left(N_{\text{АЦП}_\gamma} + C_{\text{ЦКЛ}_\gamma} + C_{\text{ЦКЛ}_\gamma \text{ cross } \theta} \right) \cdot k_{\text{ЦКЛ}_\gamma} \right), \quad (15)$$

$$\theta = \arcsin \left(\left(N_{\text{АЦП}_\theta} + C_{\text{ЦКЛ}_\theta} + C_{\text{ЦКЛ}_\theta \text{ cross } \gamma} \right) \cdot k_{\text{ЦКЛ}_\theta} \right). \quad (16)$$

Корекція додаткових температурних адитивних та мультиплікативних систематичних похибок. МСВКН не має системи термостатування, тому у реальних умовах експлуатації МСВКН температура АК лежить у межах діапазону температур.

За рахунок впливу додаткових температурних похибок, максимальна абсолютна сумарна похибка може сягати $\Delta_{\Sigma N_{\text{ЦКЛ}}} = 6 \cdot 10^{-3}$, що перевищує допустиме значення.

Графіки залежності сумарної абсолютної похибки Δ_β від кута нахилу після корекції основних похибок при різних температурах, але до температурної корекції зображені на рис. 5.

Для компенсації температурних похибок для кожної з температур, при якій випробували МСВКН, визначаються $C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ – коди АЦП, коли МСВКН встановлено горизонтально. Зміни коефіцієнтів $k_{\text{ЦКЛ}_\gamma}$, $k_{\text{ЦКЛ}_\theta}$ від температури визначаються за формулами

$$k_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ} = k_{\text{ЦКЛ}_\gamma} \left(1 + \delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ} \right), \quad (18)$$

$$k_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ} = k_{\text{ЦКЛ}_\theta} \left(1 + \delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ} \right) \quad (19)$$

де $\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ – мультиплікативні похибки зміни коефіцієнтів $k_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$ та $k_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ від температури.

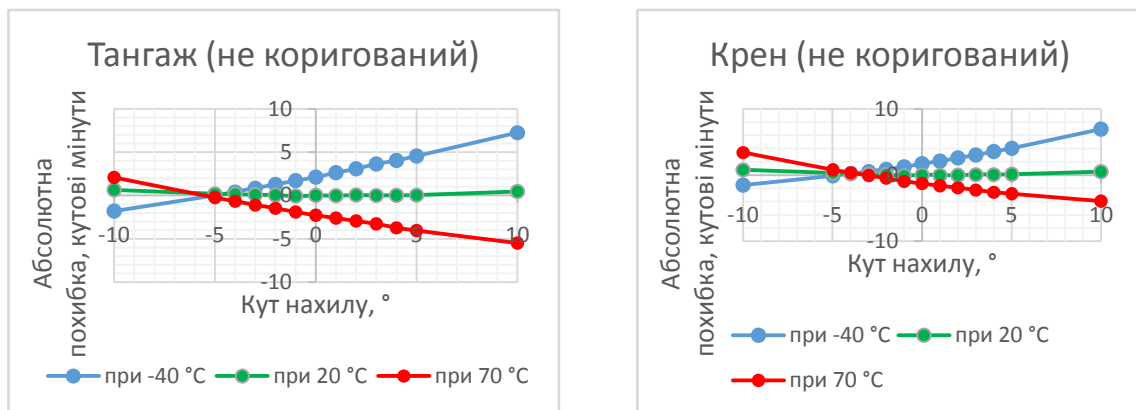


Рис. 5. Графіки залежності абсолютної похибки від кута нахилу за різних температур

Температурний діапазон відносно експериментальних температур розбивається на ділянки, на яких залежність $C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ та $\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ від температури вважається лінійною – здійснюється кусково-лінійна апроксимація. Значення коефіцієнтів $C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ та $\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ за температур, на яких була випробувана МСВКН, зведені у табл. 4.

Після застосування алгоритмів температурної корекції під час розрахунку кутів за експериментальними даними побудовано графіки залежності сумарної абсолютної похибки Δ_β , зображені на рис. 6. Абсолютна похибка не перевищує допустиму.

Таблиця 4.

Значення коефіцієнтів для температурної корекції

Температура	$C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$	$1 + \delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$	$C_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$	$1 + \delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$
$t_1 = -35^\circ\text{C}$	28	1,007710	26	1,0072336
$t_2 = -5^\circ\text{C}$	4	1,004251	-5	1,0038655
$t_3 = +20^\circ\text{C}$	-18	1	-42	1
$t_4 = +60^\circ\text{C}$	-56	0,993966	-116	0,9941364

 Δ_B Алгоритм застосування кусково-лінійної апроксимації

На рис. 7 зображені залежності величини зміщення нуля вихідних кодів АЦП каналів крену і тангажу від температури. На рис. 8 зображено залежності приростів вихідних кодів АЦП за відхилення на 10° від температури.

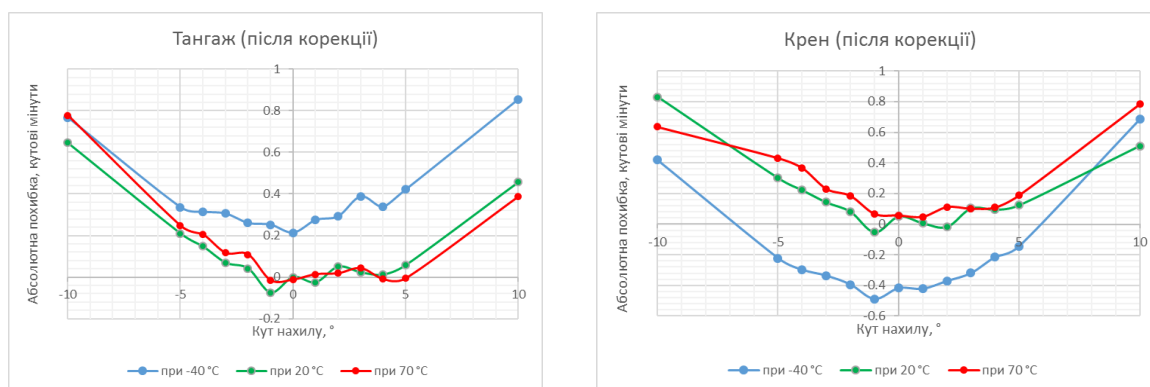


Рис. 6. Графіки залежності абсолютної похибки від кута нахилу за різних температурах після застосування алгоритму корекції

вважати залежність від температури лінійною на інтервалах, крайніми точками яких є температури калібрування.

Зміщення нуля за будь-якої температури t° всередині деякого інтервалу температур, за яких $t_1^\circ < t^\circ < t_2^\circ$, визначається як

$$C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ} = k_{\text{ЦКЛ}_\gamma} (t^\circ - t_1^\circ) + C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}, \quad (20)$$

$$C_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ} = k_{\text{ЦКЛ}_\theta} (t^\circ - t_1^\circ) + C_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}, \quad (21)$$

де

$$k_{C_{\text{ЦКЛ}_\gamma}} = \frac{C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_2^\circ} - C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ}, \quad (22)$$

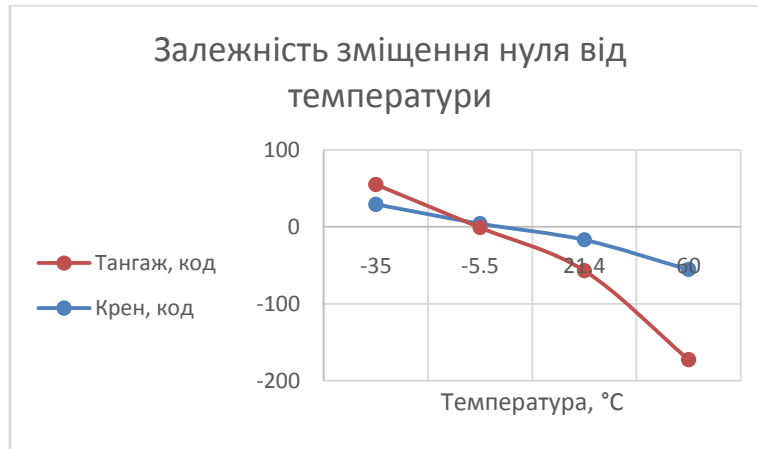


Рис. 7. Залежність зміщення нуля від температури

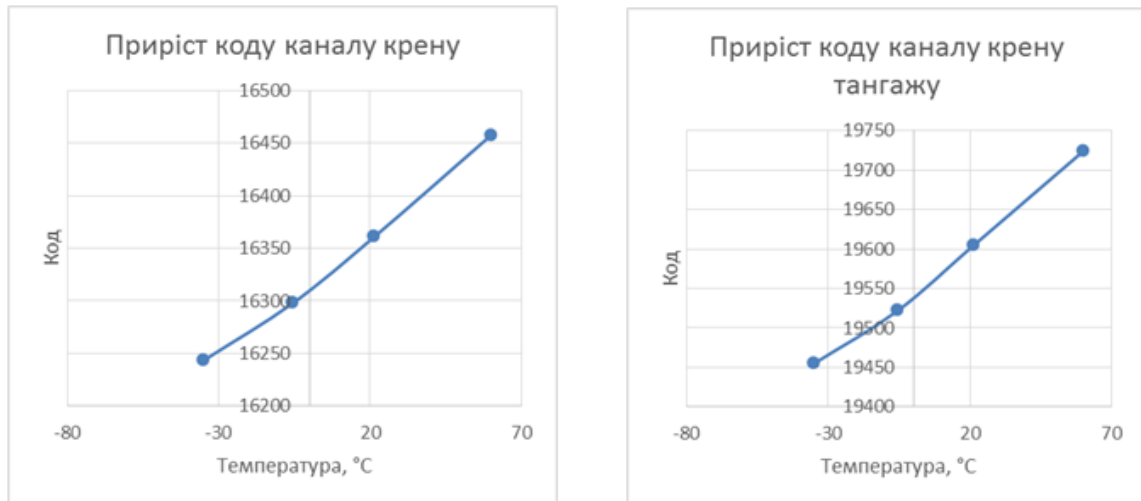


Рис. 8. Залежності приростів вихідних кодів АЦП за відхилення на 10° від температури

$$k_{C_{\text{ЦКЛ}_\theta}} = \frac{C_{\text{ЦКЛ}_\theta t_2^\circ} - C_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ}, \quad (23)$$

де $k_{C_{\text{ЦКЛ}_\gamma}}$, $k_{C_{\text{ЦКЛ}_\theta}}$ — константи (кутовий коефіцієнт прямої),
 $C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_2^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\theta t_2^\circ}$, $C_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}$ — константи, зміщення нуля за температур t_2° , t_1° , визначені під час калібрування.

Величина мультиплікативної похибки коефіцієнтів $k_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$ та $k_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ від температури за будь-якої температури всередині деякого інтервалу температур, за яких $t_1^\circ < t^\circ < t_2^\circ$, визначається як

$$\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ} = k_{\delta \text{ЦКЛ}_\gamma} (t^\circ - t_1^\circ) + \delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}, \quad (24)$$

$$\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ} = k_{\delta \text{ЦКЛ}_\theta} (t^\circ - t_1^\circ) + \delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}, \quad (25)$$

де

$$k_{\delta \text{ЦКЛ}_\gamma} = \frac{\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_2^\circ} - \delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ}, \quad (26)$$

$$k_{\delta \text{ЦКЛ}_\theta} = \frac{\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t_2^\circ} - \delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ}, \quad (27)$$

де $k_{\delta \text{ЦКЛ}_\gamma}$, $k_{\delta \text{ЦКЛ}_\theta}$ – константи (кутовий коефіцієнт прямої),
 $\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_2^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\gamma t_1^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t_2^\circ}$, $\delta_{\text{ЦКЛ}_\theta t_1^\circ}$ – константи, величини
 мультиплікативних похибок коефіцієнтів $k_{\text{ЦКЛ}_\gamma t^\circ}$ та $k_{\text{ЦКЛ}_\theta t^\circ}$ за
 температур t_2° , t_1° , визначені під час калібрування.

Програмне забезпечення

Для МСВКН розроблене програмне забезпечення мікроконтролера *ADuCM360* та два додатки для ПК із інтерфейсом користувача – для розробників та користувачів системою.

Програмне забезпечення мікроконтролера *ADuCM360* розроблене мовою *C* та виконує наступні функції:

- ініціалізація таймерів, АЦП, *I2C*, *UART*, термодатчиків;
- отримання даних із АЦП;
- отримання даних із термодатчиків по шині *I2C*;
- корекція основних адитивних та мультиплікативних систематичних похибок та додаткових від температури;
- обчислення кутів крену та тангажу;
- формування вихідного пакету даних;
- видача даних через інтерфейс *UART*.

Програмне забезпечення для ПК розроблене мовою *C++* із використанням фреймворку *QT*. Були створені модифікації програми для передачі двох видів вихідного пакету даних – у програму для розробника та користувача.

Загальний вигляд інтерфейсу користувача програми для розробника МСВКН представлено на рис. 9.

Програма для розробників дозволяє візуалізувати на мітках та графіках, а потім зберегти у форматі *.csv* «сирі» (без корекцій) цифрові

коди із АЦП; цифрові кореговані коди із АЦП; цифрові коди із термодотчиків; розраховані кути крену та тангажу у розмірності «градуси, кутові мінути, кутові секунди».

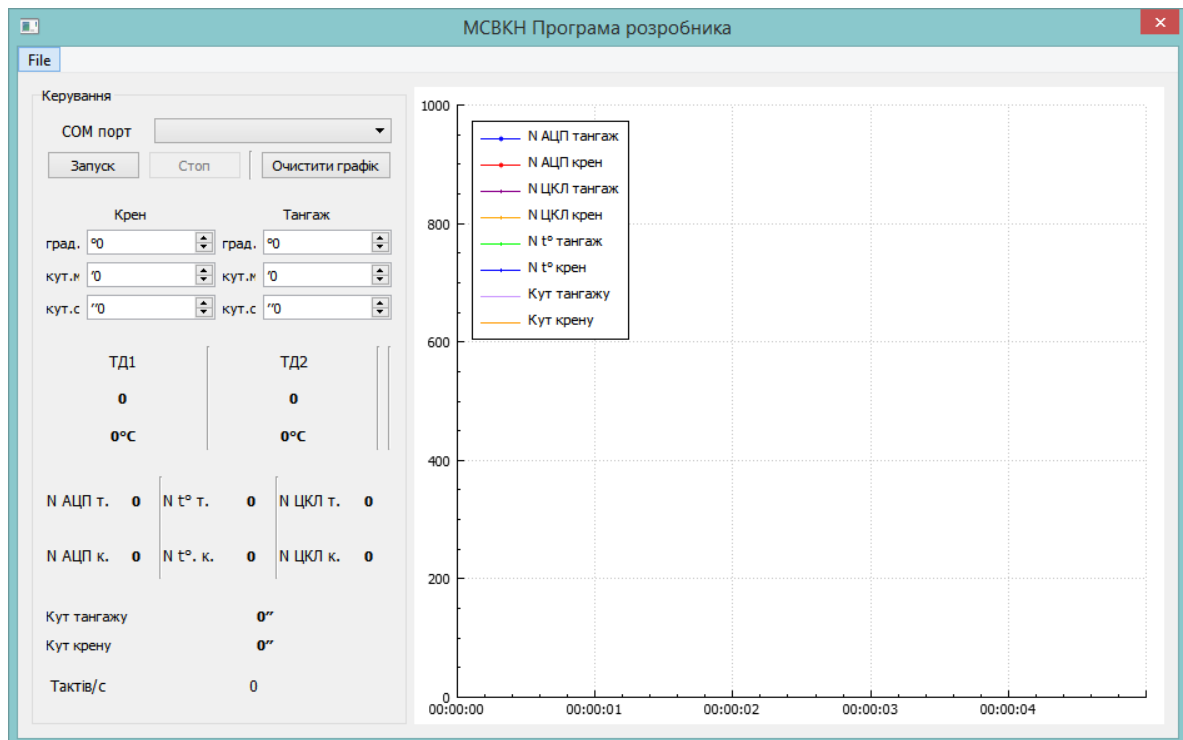


Рис. 9. Інтерфейс користувача програми для розробника МСВКН

Функції програми для розробників:

- вибір *SOM*-порту комп'ютера та підключення до нього;
- відзначення розробником кутів, які він задав МСВКН під час експерименту (за допомогою ОДГ чи іншого обладнання);
- запуск, призупинення передачі даних;
- відображення даних у реальному часі у числовому вигляді та на графіках;
- відображення тактів;
- після зупинки передачі обчислення середнього арифметичного кожного виду даних та зберігання даних.
- Загальний вигляд інтерфейсу програми для користувача МСВКН представлено на рис. 10.

Програма для користувачів дозволяє візуалізувати на мітках та графіках, а потім зберегти у форматі *.csv*, величини кутів крену і тангажу у розмірності «градуси, кутові мінути, кутові секунди».

Функції програми для користувача:

- вибір *SOM*-порту ПК та підключення до нього;
- запуск, призупинення передачі даних;

Прилади та методи контролю

- відображення даних у реальному часі у числовому вигляді та на графіках;
- після зупинки передачі обчислення середнього арифметичного кожного виду даних та зберігання даних.

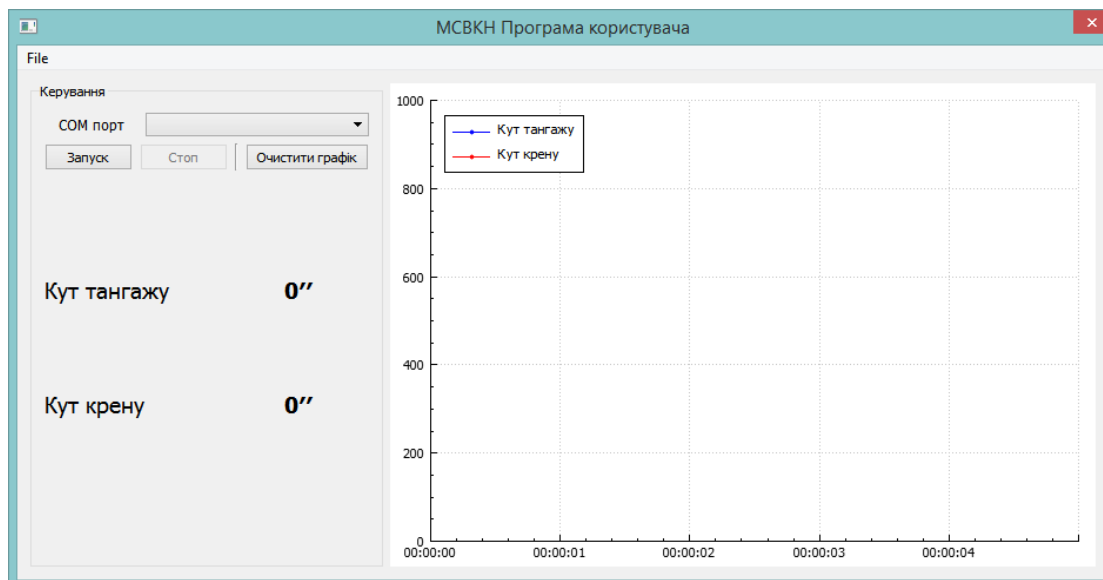


Рис. 10. Інтерфейс користувача програми для користувача МСВКН

Висновки

Надані основні результати, отриманні під час розробки, виготовлення та експериментальному дослідженні мікропроцесорної системи вимірювання кутів нахилу нерухомого об'єкту від площини горизонту. Для досягнення заданої технічними вимогами точності вимірювання використано алгоритми корекції зі застосуванням кусково-лінійної апроксимації. На основі розроблених алгоритмів розроблена та записана у пам'ять мікроконтролера програма збору, обробки і передачі на ПК даних. Розроблене програмне забезпечення для розробника та для користувача системи.

Подальше вдосконалення розробки дозволить заснувати в Україні виробництво високоточних пристроїв вимірювання кутів крену та тангажу для забезпечення потреб вітчизняних виробників нової техніки.

Список використаної літератури

1. Інклінометр // Вікіпедія. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D0%BA%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80> – Дата доступу: 05.11.17 – Інклінометр.
2. ГОСТ 24151-87 Инклинометры. Типы. Основные параметры и общие технические требования.
3. Datasheet DSIC Inclinometer // ShernborneSensors – Режим доступу: http://www.sherbornesensors.com/uploads/files/Files/DSIC_10_151.pdf – Дата доступу: 10.11.17 – Sherborne_corp v4.
4. Datasheet DXI-100/200 Series Inclinometer // Jewell Instruments – Режим доступу: http://jewellinstruments.com/wp-content/uploads/2015/04/DXI-100_200-Digital-Inclinometer_04-13-15_rev6_2.pdf – Дата доступу: 10.11.17 – DXI 100_200 Digital Inclinometer_04-13-15_rev6.
5. Datasheet JDI-100/200 MEMS Inclinometer Series // Jewell Instruments – Режим доступу: <http://jewellinstruments.com/wp-content/uploads/2017/06/JDI-Datasheet-Rev-3.pdf> – Дата доступу: 10.11.17 – JDI Rev 3.
6. Datasheet ACA2000 - High Accuracy Digital Type Dual-Axis Inclinometer with Full Temperature Compensation // Rion Sensor – Режим доступу: http://www.rion-electronic.com/pdf/inclinometer_aca2000t.pdf – Дата доступу: 10.11.17 – inclinometer_aca2000t.pdf.
7. Datasheet ADuCM360 Analog Devices // Analog Devices – Режим доступу: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADuCM360_361.pdf – Дата доступу: 10.01.18 – ADuCM360/ADuCM361 (Rev. D).
8. Ціделко В. Д. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб.: у 2 т. Т. 2 / В. Д. Ціделко, Н. А. Яремчук, С. А. Затока. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015 – 268 с.
9. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1976 – 432 с.
10. Скрипковська М. Г. Розробка пристрою вимірювання кутів крену та тангажу нахилу нерухомого об'єкту від площини місцевого горизонту / М. Г. Скрипковська // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2018»: збірник тез доповідей учасників (ел.), 13-18 лютого 2018 р., м. Славське, 2018. – С. 37-38.