

М.П. СВИТА  
ТОВ "НВФ "ПРОБА", Київ  
Н.М. ЗАЩЕПКИНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## РОЗРОБКА ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КРИЛЬЧАТИХ ВИМІРЮВАЧІВ ШВИДКОСТІ ТА ВИТРАТОМІРІВ ГАЗІВ

*В роботі запропонована конструкція ємнісного перетворювача для крильчатих вимірювачів швидкості газових потоків та витратомірів газів на їх основі. Розроблено діючий макет зонду з ємнісним перетворювачем кутової швидкості обертання крильчатки в електричний імпульсний сигнал. Частота вихідного імпульсного сигналу зонду пропорційна швидкості газового потоку в робочому температурному діапазоні від -40 до +350 °C, що дозволяє використовувати даний зонд при високотемпературних технологічних та екологічних вимірюваннях. Наведені структурна та електрична принципова схеми ємнісного перетворювача та описаний принцип його роботи. Знята залежність ємності зонду від температури в діапазоні від 20 до 350 °C та апробовано зонд в аеродинамічній трубі «Проба-25». Проведено вимірювання чутливості крильчатки та знято характеристику залежності частоти на виході зонду від швидкості повітряного потоку в аеродинамічній трубі. Перевірена працездатність зонду при максимальній робочій температурі.*

*Ключові слова: ємнісний перетворювач, швидкість потоку, газовий потік, витратомір газу, анемометр, зонд, крильчатка.*

M.P. SVYTA  
LLC "RPC "PROBA"  
N.M. ZASHCHEPKINA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## DEVELOPMENT OF A CAPACITIVE TRANSDUCER FOR WING VELOCITY METERS AND GAS FLOWMETERS

*In the paper, the design of a capacitive converter for winged gas flow meters and gas flow meters based on them is proposed. The principle of operation of a wing meter is based on the conversion of the rate of gas flow into the angular velocity of the impeller - a speed sensor. An active model of the probe with a capacitive converter of the angular velocity of the impeller in an electric pulse signal was developed. The frequency of the output pulse signal of the probe is proportional to the velocity of the gas stream in the operating temperature range from -40 to +350 °C, which allows the use of this probe at high-temperature technological and environmental measurements. The probe is a bar, with one end of which there is a measuring head, and with another handle. The impeller axis is fixed in the metal body of the head of the probe, which protects the impeller from mechanical damage. In the probe handle is an electronic plate maker. The charger generates an electrical impulse with each passing of the wing of the impeller over the base of the base capacitance. The impeller has four blades, so we have four pulses per rotating impeller. The article presents the structural and electrical principle schemes of the capacitive converter and describes the principle of its operation. The formulas for calculating the equivalent inductance for setting the generator operating point at the front of the band filter are given. For stable operation of the generator in a wide temperature range, it is proposed to use automatic frequency adjustment. In the experimental parts, the dependence of the probe's capacity on the temperature in the range from 20 to 350 °C was removed and the probe tested in the "Proba-25" aerodynamic tube. Measured the sensitivity of the impeller and the characteristics of the dependence of the frequency on the output of the probe on the air flow velocity in the aerodynamic tube have been taken. The dependence of the frequency at the output of the generator board on the flow rate of the gas is linear in the range from 4 to 20 m/s. The speed of the gas flow at the output of the moldboard is calculated. The calculations indicate rather high accuracy of the angular velocity of the impeller to the frequency of electrical oscillations. The calculated value of the relative error of measurement of the air flow rate does not exceed 2% in the range of speeds from 2 to 25 m/s. Proven operating efficiency at maximum operating temperature.*

*Key words: capacitance converter, flow rate, gas flow, gas flow meter, anemometer, probe, impeller.*

### Вступ

Крильчаті вимірювачі швидкості направлених потоків газів (анемометри) та витратоміри на їх основі знайшли широке коло застосувань в різних галузях завдяки простоті їх використання та високій точності вимірювання. Принцип дії крильчатого вимірювача оснований на перетворенні швидкості газового потоку в кутову швидкість крильчатки – датчика швидкості [1]. Крильчаті вимірювачі поділяють на портативні та стаціонарні. Портативні використовують при налагодженні систем кондиціонування, перевірки димоходів та вентиляційних каналів, вимірювання витрати викидів газів від стаціонарних джерел забруднення атмосфери та ін. Стаціонарні прилади використовують для неперервного вимірювання швидкості та витрати газів при технологічних вимірюваннях.

Витрата газу може бути виражена в об'ємних та масових одиницях. Формула для розрахунку об'ємної витрати за допомогою вимірювача швидкості газового потоку має вигляд (1) [2]:

$$Q = K_y \cdot V \cdot S, \quad (1)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата (в робочих умовах), [м<sup>3</sup>/с];  $K_y$  – відношення середньої швидкості газового потоку в даному перерізі до швидкості потоку в точці вимірювання;  $V$  – місцева швидкість газового потоку в точці вимірювання, [м/с];  $S$  – площа вимірювального перетину газоходу, [м<sup>2</sup>].

Формула для розрахунку масової витрати за допомогою вимірювача швидкості газового потоку має вигляд (2) [3]:

$$Q_m = Q \cdot \rho \cdot 3600, \quad (2)$$

де  $Q_m$  – масова витрата, [кг/год];  $Q$  – об'ємна витрата (в робочих умовах), [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];  
 $\rho$  – щільність газу (в робочих умовах), [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ].

Для перетворення кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань застосовують такі принципи: оптичні, магнітні, індуктивні, ємнісні [4]. На даний час серійно випускаються конструктивно закінчені оптичні, магнітні, індуктивні, ємнісні датчики, але всі вони мають малий діапазон робочих температур та великі розміри [5]. Це суттєво обмежує їх використання в вимірювачах швидкості та витратомірах газів.

Крильчаті портативні вимірювачі виготовляють такі виробники: Testo AG, Kimo instruments, Uni-T, та ін., але їх робочий температурний діапазон від  $-20$  до  $+70$  °С. Компанія «Höntzsch GmbH» виробляє портативні (серія «flowtherm NT») та стаціонарні (серія ZS) крильчаті прилади з розширеним діапазоном робочих температур від  $-40$  до  $+550$  °С та діапазоном вимірювання швидкості газового потоку від  $0,4$  до  $120$  м/с. Фірма «Höntzsch GmbH» використовує безконтактний індуктивний метод перетворення кутової швидкості крильчатки [6].

#### Постановка проблеми

Вимірювання швидкості та об'ємної витрати димових, технологічних газів може відбуватись в широких температурних діапазонах. Ця умова звужує кількість датчиків, що серійно випускаються для таких вимірювань.

Таким чином, запропоновано розробити діючий макет зонду з ємнісним перетворювачем кутової швидкості обертання крильчатки в електричний імпульсний сигнал.

Частота вихідного імпульсного сигналу повинна бути пропорційною швидкості газового потоку в робочому температурному діапазоні від  $-40$  до  $+350$  °С, що дозволить використовувати даний пристрій при високотемпературних технологічних та екологічних вимірюваннях.

#### Результати роботи

Було виготовлено зонд пристрою довжиною 1 метр, який показано на рис. 1.



Рис. 1. Фото зонду вимірювача швидкості та витрати газів

Зонд представляє собою штангу, з одного кінця якої знаходиться вимірювальна голівка, а з іншого ручки. Вісь крильчатки закріплена в металевому корпусі голівки зонду, який захищає крильчатку від механічних пошкоджень.

Голівка показана на рис 2 б, вона складається з корпуса, базової ємності та двох шпиль між якими кріпиться крильчатка. Голівка та штанга виготовлені зі сталі 12Х18Н10Т. Поперечний переріз та фото голівки і крильчатки показані на рис. 2 а, б, в.

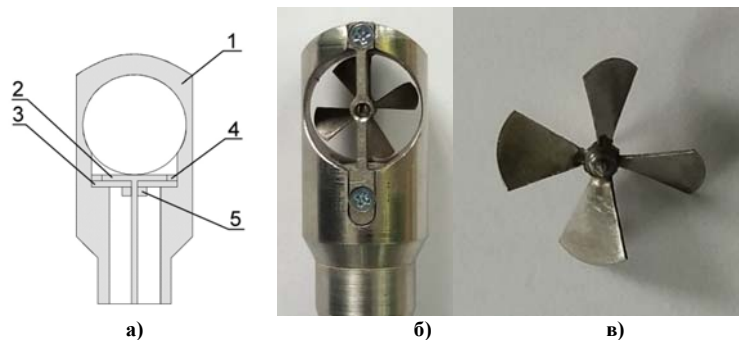


Рис. 2. а) поперечний переріз голівки. 1 – корпус, 2 – обкладка базової ємності, 3 – слюдяний діелектрик, 4 – герметик, 5 – гайка, б) голівка в сборі, в) крильчатка

Крильчатка складається з вісі, пропелера та двох втулок. Пропелер запресований по центру вісі за допомогою втулок.

Базова ємність утворена між обкладкою базової ємності і корпусом голівки (див. рис. 2 а). Для збільшення чутливості обкладка базової ємності встановлена таким чином, щоб відстань від неї до лопасті крильчатки була не більше 1 мм. Між базовою ємністю та платою формувача протягнутий провід для передачі зміни ємності.

У ручці зонду розташована електронна плата формувача. Плата формувача генерує електричний імпульс при кожному проходженні крила крильчатки над обкладкою базової ємності. Крильчатка має чотири лопасті, тому на один оберт крильчатки маємо чотири імпульси.

Структурна схема ємнісного перетворювача кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань наведена на рис. 3.

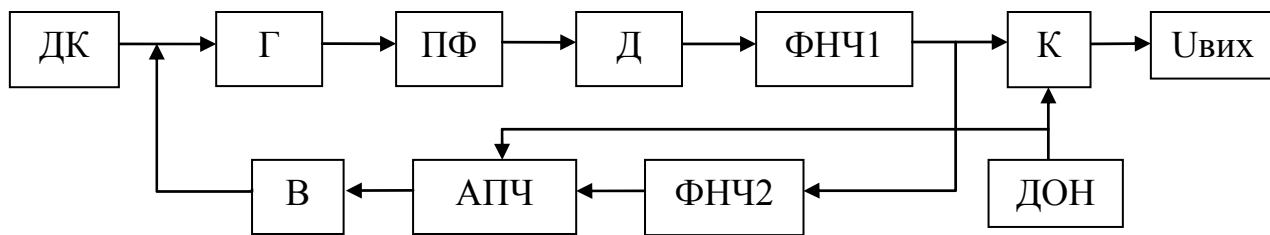


Рис. 3. Структурна схема смісного перетворювача кутової швидкості обертання крильчатки в частоту електричних коливань: ДК – датчик крильчатки, Г – генератор, ПФ – полосовий фільтр, Д – детектор, ФНЧ1 – фільтр нижніх частот 1, К – компаратор, ДОН – джерело опорної напруги, ФНЧ2 – фільтр нижніх частот 2, АПЧ – автопідстройка частоти, В – варикап, Увих – вихідна напруга (прямокутні імпульси з частотою пропорційною кутовій швидкості обертання крильчатки)

Генератор (Г) генерує гармонічні коливання, частота яких залежить від резонансного LC-контура в який входить смінь зонду. При проходженні крила крильчатки над обкладкою базової смності та віддаленні від неї змінюються параметри LC-контура та змінюється частота генератора на  $\Delta f$ , таким чином відбувається частотна модуляція швидкості обертання крильчатки. Перехід від частотної до амплітудної модуляції відбувається в полосовому фільтрі (ПФ) з центральною частотою 10,7 МГц. Робоча точка знаходиться на фронті характеристики ПФ. Застосований ПФ (SFE10.7MS3) має дуже круту амплітудно-частотну характеристику, вона показана на рис. 4. Зміна входної частоти на  $\Delta f$  призводить до зміни амплітуди вихідної частоти ПФ, таким чином отримуємо амплітудно модульовану швидкість обертання крильчатки. Детектор (Д) разом з фільтром низьких частот (ФНЧ1) перетворює високочастотні коливання в низькочастотні навколо напруги рівній джерелу опорної напруги (ДОН). Компаратор (К) з гістерезисом зрівнює напруги між ДОН та виходом ФНЧ1, таким чином К формує прямокутні імпульси, пропорційні кутовій швидкості обертання крильчатки. Для утримання робочої точки при змінах температури в схемі присутня автоматична підстройка частоти (АПЧ). АПЧ відстежує зміни входної напруги та намагається тримати її на рівні напруги ДОН завдяки варикапу (В).

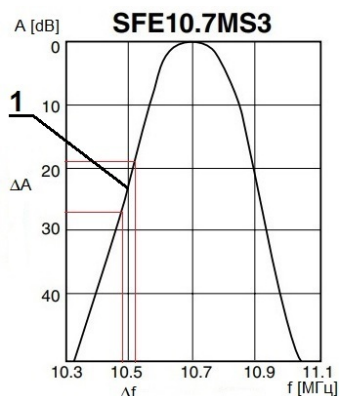


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика ПФ. 1 – робоча точка

Електрична принципова схема формувача представлена на рис. 5.

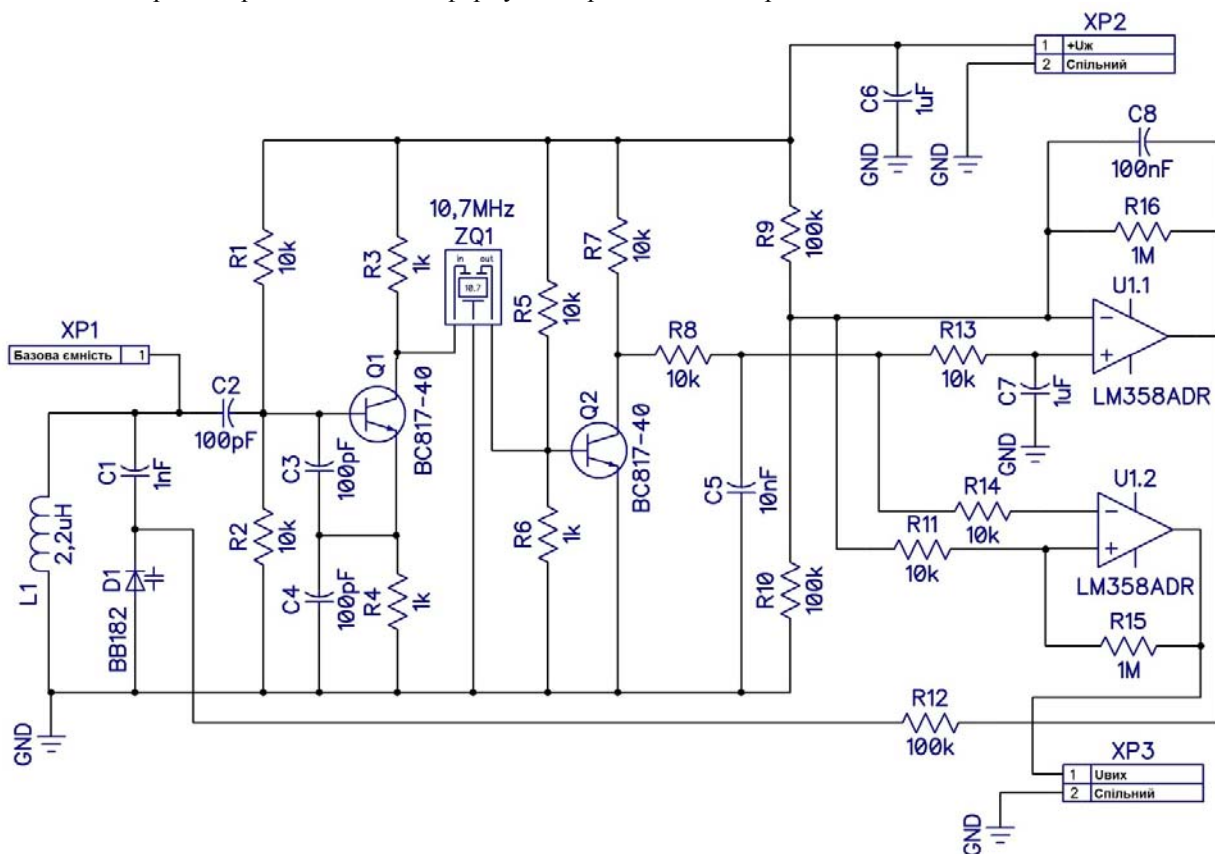


Рис. 5. Електрична принципова схема формувача

Напруга живлення схеми дорівнює 5 В та подається на роз'єм XP2. До роз'єму XP1 під'єднується

зонд. Генератор зібраний за схемою ємнісна трьохточка на елементах (C1-C4, L1, R1-R4, D1, Q1) з можливістю керування ним за допомогою напруги поданої на варикап. Частота генератора повинна бути близькою до центральної робочої частоти полосового фільтра – 10,7 МГц, вона розраховується за формулою Томсона (3) [7]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_e}} \quad (3)$$

де  $f$  – частота генератора, [Гц];  $L_e$  – еквівалентна індуктивність, [Гн];  $C_e$  – еквівалентна ємність, [Ф].

Еквівалентна ємність та еквівалентна індуктивність доволі складні для розрахунку параметри схеми, тому що зонд має свої значення ємності та індуктивності. Радіо елементи мають певні допуски ще й в схемі присутній нелінійний елемент – варикап. Для спрощення розрахунків виміряємо значення ємності зібраного зонду і приймемо її за еквівалентну. Ємність зібраного зонду виміряна приладом UNI-T UT2004 становить 98 пФ при температурі 20 °С.

Перетворимо формулу (3) в формулу (4) для знаходження значення індуктивності  $L_1$  резонансного LC-контурі:

$$L_1 = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C_e} \quad (4)$$

Для нашого випадку:  $f=10,7$  МГц,  $C=98$  пФ, розрахована  $L=2,26$  мкГн, найближче значення із ряду номіналів E24 дорівнює 2,2.  $L_2=2,2$  мкГн, допуск  $\pm 10\%$ . Полосовий фільтр ZQ1 (SFE10.7MS3) [8]. Детектор зібраний на елементах (R5-R7, Q2). ФНЧ1 – зібраний на елементах (R8, C5), він має частоту зрізу близько 10 кГц. Компаратор (К) зібраний на (U1.2, R11, R14, R15), ширина зони гістерезису К при номіналах зазначених на схемі рис. 5, становить 50 мВ. Джерело опорної напруги організовано на дільнику (R9, R10) з коефіцієнтом 0,5 та становить 2,5 В. Вихідна напруга схеми формувача з частотою пропорційною швидкості обертання крильчатки знімається з роз'єму ХР3. Дана напруга зручна для інтеграції з цифровими вимірвальними системами, тому що має логічний рівень 5 В.

#### Експериментальна частина

Було отримано залежність ємності зонду від температури в діапазоні від 20 до 350 °С в печі, яка представлена на рис. 6.

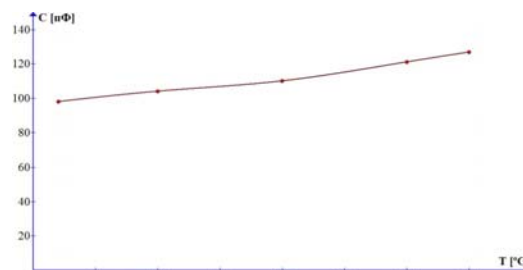


Рис. 6. Залежність ємності зонду від температури

Згідно з графіком ємність змінюється від 98 до 127 пФ в діапазоні температур від 20 до 350 °С. Варикап ВВ182, який застосований в схемі формувача, здатен зкомпенсувати зміну ємності при напрузі керування ним від 0,5 до 5 В на 45 пФ [9]. Даної перестройки по ємності буде достатньо для підстройки частоти генератора та утримання робочої точки в зазначеному температурному діапазоні.

Зонд було апробовано в аеродинамічній трубі (АТ) «Проба-25», що належить ТОВ «НВФ «ПРОБА». Основні технічні характеристики АТ «Проба-25» показані в табл. 1.

Таблиця 1

#### Технічні характеристики АТ «Проба-25»

Діапазон відтворення швидкості повітря, [м/с]	0,1-25
Абсолютна похибка, [м/с]	$\pm(0,05+0,015 \cdot V)$ , де $V$ – чисельне значення швидкості повітряного потоку, виражене в метрах за секунду.
Діаметр робочого перетину, [мм]	300

Чутливість крильчатки була виміряна наступним чином: зонд був закріплений в АТ таким чином, щоб голівка зонду розташовувалася в центральній частині робочого перетину АТ. Повздовжня вісь зонда була перпендикулярна до поздовжньої вісі АТ, а вісь крильчатки паралельна до поздовжньої вісі АТ. Швидкість повітря при якій крильчатка почала стійко обертатись становила 0,52 м/с.

Також було знято характеристику залежності середнього значення частоти на виході плати формувача від швидкості повітря в АТ за допомогою частотоміру АТТЕН F1000С, що показано на рис. 7.

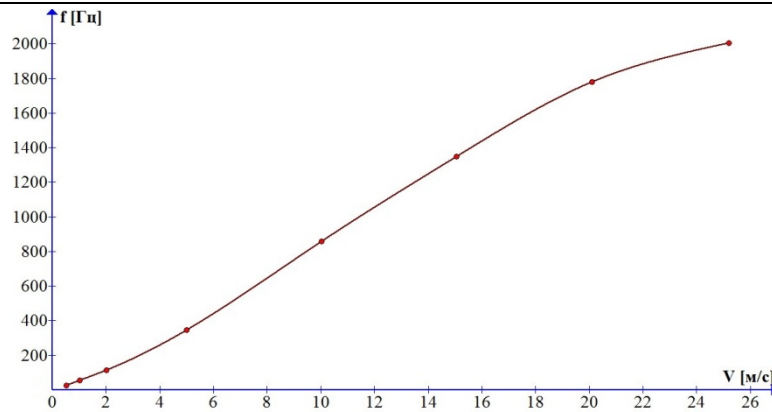


Рис. 7. Характеристика залежності частоти імпульсів на виході плати формувача від швидкості потоку повітря в АТ

Отримана характеристика, девіація частоти та розраховані дані зведені в табл. 2. Роздільна здатність показує значення швидкості в кожному імпульсі на виході плати формувача. Розрахована швидкість показує реальне значення, яке могло б бути отримане вимірювальною системою.

Для деяких прецизійних використань при виготовленні витратомірів буде недостатньо даної роздільної здатності, але її можна легко збільшити. Оскільки, частота це кількість імпульсів за одну секунду, то рахунок імпульсів можна вести, наприклад, за дві секунди, при такому підході роздільна здатність збільшиться вдвічі.

Використаний частотомір має низьку інерційність при вимірюванні частоти, тому девіація має великі значення. Зменшити девіацію можна застосувавши програмний цифровий фільтр низьких частот при реалізації вимірювальної системи. Працездатність зонду була перевірена при максимальній робочій температурі зонду 350 °С за допомогою будівельного фену.

Таблиця 2

#### Залежність частоти на виході плати формувача від швидкості потоку повітря в АТ

Швидкість потоку в АТ, [м/с]	0,52	1,01	2,01	5,00	10,03	15,05	20,1	25,2
Середня частота на виході плати формувача, [Гц]	27	55	115	346	861	1353	1782	2005
Девіація частоти, [Гц]	±1	±2	±2	±4	±9	±16	±24	±34
Роздільна здатність зонду, [м/с*імпульс]	0,019	0,018	0,017	0,014	0,012	0,011	0,011	0,013
Розрахована швидкість на виході зонду, [м/с]	0,52 ±0,019	1,01 ±0,036	2,01 ±0,034	5,00 ±0,056	10,03 ±0,108	15,05 ±0,176	20,1 ±0,264	25,2 ±0,442
Відносна похибка, [±%]	3,7	3,6	1,7	1,1	1,1	1,2	1,3	1,8

#### Висновки

Розроблена електронна схема ємнісного перетворювача дозволяє перетворювати кутову швидкість крильчатки зонду в частоту електричних коливань, приведену до стандартного цифрового логічного рівня 5В. Виконано вимірювання залежності ємності зонду від температури, залежність показує, що зонд змінює свою ємність в діапазоні температур від 20 до 350 °С на 29 пФ. Дану зміну ємності, в залежності від температури, схема формувача здатна зкомпенсувати за допомогою використаного варикапу ВВ182.

Залежність частоти на виході плати формувача від швидкості газового потоку має лінійний характер в діапазоні від 4 до 20 м/с.

Розрахована швидкість газового потоку на виході плати формувача свідчить про достатньо високу точність перетворення кутової швидкості крильчатки в частоту електричних коливань. Розраховане значення відносної похибки вимірювання швидкості потоку повітря не перевищує 2% в діапазоні швидкостей від 2 до 25 м/с.

#### Література

1. Кулебякин В.В. Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов : учебнометодическое пособие / Кулебякин В.В. – Минск : БНТУ, 2017.
2. ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. Государственный стандарт союза ССР. – [Дата введения с 01.07.1980 г.].
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ : Справочник : Кн. 1. – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб : Политехника, 2002. – 409 с.
4. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Мозгова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. – 108 с.

5. Коснырев В. Датчики компании KLASCHKA / В. Коснырев // Chip news. – 2007. – № 4(117). – С. 16–26.
6. Vane wheel flow sensor ZS25 with optional integrated transducer UFA. Höntzsch GmbH. URL: [www.hoentzsch.com](http://www.hoentzsch.com)
7. Элементарный учебник физики : учеб. пособие : в 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / под ред. Г.С. Ландсберга. – 13-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 656 с.
8. Data sheet: Piezo filters Ceramic filters low loss, wide or narrow band, Miniature SFE MA/MTE/MVE/MFP 10.7MHz. URL: [www.murata.com](http://www.murata.com)
9. Product data sheet: BB182 VHF variable capacitance diode. rev.-03 24 february 2009. URL: [www.nxp.com](http://www.nxp.com)

#### References

1. Kulebyakin V.V. Metody i pribory dlya izmereniya rashoda zhidkostej i gazov : uchebnometodicheskoe posobie / Kulebyakin V.V. – Minsk : BNTU, 2017.
2. GOST 8.361-79. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Rashod zhidkosti i gaza. Metodika vypolneniya izmerenij po skorosti v odnoj tochke secheniya truby. Gosudarstvennyj standart soyuza SSR. – [Data vvedeniya s 01.07.1980 g.].
3. Kremlevskij P.P. Rashodomery i schetchiki kolichestva veshestv : Spravochnik : Kn. 1. – 5-e izd. pererab. i dop. – SPb : Politehnika, 2002. – 409 s.
4. Metody i sredstva izmerenij, ispytaniy i kontrolya : uchebnoe posobie. V 5 ch. / A.G. Divin, S.V. Ponomarev, G.V. Mozgova. – Tambov : Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. – Ch. 2. – 108 s.
5. Kosnyrev V. Datchiki kompanii KLASCHKA / V. Kosnyrev // Chip news. – 2007. – № 4(117). – С. 16–26.
6. Vane wheel flow sensor ZS25 with optional integrated transducer UFA. Hontzsch GmbH. URL: [www.hoentzsch.com](http://www.hoentzsch.com)
7. Elementarnyj uchebnyk fiziki : ucheb. posobie : v 3 t. Т. 3. Kolebaniya i volny. Optika. Atomnaya i yadernaya fizika / pod red. G.S. Landsberga. – 13-e izd. – М. : FIZMATLIT, 2009. – 656 s.
8. Data sheet: Piezo filters Ceramic filters low loss, wide or narrow band, Miniature SFE MA/MTE/MVE/MFP 10.7MHz. URL: [www.murata.com](http://www.murata.com)
9. Product data sheet: BB182 VHF variable capacitance diode. rev.-03 24 february 2009. URL: [www.nxp.com](http://www.nxp.com)

Рецензія/Peer review : 15.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко