

ИЗМЕРВАНЕ НА СИЛИ. ПЕТКАНАЛЕН ИЗМЕРИТЕЛЕН УСИЛВАТЕЛ НА СИЛИ

ACCELEROMETER POWER SUPPLIES/AMPLIFIER/

ПЕТКАНАЛЪН ИЗМЕРИТЕЛЪН УСИЛИТЕЛ ДЪЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ

Доц. д-р инж. Начев Н, доц. д-р инж. Пандиев И.
Технически университет София, България

Abstract: *The basic aspects and particularities when measuring forces – concentrated forces, internal tension, pressure, have been presented in this study.*

A detailed description has been provided of the five channel measuring force amplifier, which has been developed in the Scientific Research Laboratory "Vibration and Noise in Machinery" at the Technical University – Sofia. Active piezoelectric converters have been used as primary measurement converters, and the range of measured forces is 0,05 – 600 N.

The basic aspects have been discussed when designing similar systems for measuring force.

KEYWORDS: CONCENTRATED FORCE, INTERNAL TENSION, PRESSURE, PIEZOELECTRIC CONVERTER, AMPLIFIER, POWER SOURCE, LOW-FREQUENCY FILTER.

1. Увод

Усилията, действащи на елементите на машините и механизмите, може да бъдат както съсредоточени, така и разпределени по някаква повърхнина. Различават се линейно насочени и въртеливи /въртящи моменти/ съсредоточени усилия. Разпределените усилия се подразделят на външни – налягане и вътрешни – напрежения, възникващи в изследвания обект.

Обхватът на съсредоточените сили, от измерванията на които се нуждаят редица отрасли на съвременната наука и техника, е извънредно широк [4,8]. При натурните изпитвания на машините или контрол на технологични процеси, измерваните усилия достигат стойност $10^6 - 10^8 \text{ N}$ и повече. От друга страна, в областта на научните изследвания съществуват потребности за измерване на много малки усилия – от порядъка на 10^{-5} N , а понякога и до 10^{-12} N . По такъв начин пълният обхват на измерваните усилия е от 10^{-12} до 10^8 N , т.е. работен обхват около $D = 10^{20}$.

Създаването на единни измерителни устройства с такъв широк обхват е трудно постижимо, поради което се налага прилагането на различни методи за измервания. Това е така, защото е трудно да се създадат силоизмерителни устройства с работен обхват по-голям от 10^4 .

Обхватът на налягането, в съвременната техника е в границите от 0 до 10^{12} Pa и повече. При това прагът на чувствителност на измерителните устройства е ограничен със стойности от порядъка на $10^{-2} - 10^{-4} \text{ Pa}$. Поради това пълният обхват на измерваното налягане е около $D = 10^{13}$.

В съвременната вакуумна техника съществува необходимост от измерване на вакуум много по-малък от 10^{-2} Pa . Но в подобни случаи поради отсъствие на методи за силови измервания на такива налягания, се измерва вече не сила, възникваща вследствие налягането на средата, а непосредствено – концентрацията на частиците в разреденото вещество.

Вътрешното напрежение в детайлите на конструкциите обикновено е в границите от 0 до 2000 MPa . Измерванията на такива напрежения са от интерес за изследователя, преди всичко от гледна точка на якостните изисквания на машинните елементи. Поради това измерването на напрежения, по-малки от 10 MPa , обикновено не представлява интерес. Така, пълният обхват на измерваните вътрешни напрежения, практически е около $D = 200$,

който може да бъде покрит с използването на единно измерително устройство, например – тензорезистори или пиезоелектрични възприематели.

При електрическите измервания на механични усилия, може да се използват различни видове измерителни преобразуватели. При това следва да се различат няколко различни методи за тяхното приложение.

На първо място, може да се използват такива преобразуватели, за които естествената входна величина, съответства на измерваното усилие /сила, въртящ момент, налягане или напрежение/. Така например, за измерване на налягане може да се използва пиезоелектрични или магнитоеластични преобразуватели, за които естествената входна величина е външното разпределено налягане. За измерването на вътрешни напрежения и малки деформации – тензорезистори, които са чувствителни именно спрямо деформациите на детайла.

На второ място, посредством еластични елементи, измерваните усилия, налягане или въртящ момент, може да се преобразуват в достатъчно големи /части от милиметъра/ премествания, и тогава де се използват преобразуватели, чувствителни към преместване.

И двата метода се прилагат в практиката, като избора на единия или другия се определя от характера и особеностите на конкретната задача на измерването. Едно от важните условия, за избора на метода за построяването на измерителната система за измерване на усилия, налягане или деформации е характерът на изменението на измерваната величина. При измерването на бързопроменящи се величини, всички преобразуватели на измерителното устройство, трябва да имат достатъчно малка инертност, така, че динамичният процес да се възпроизвежда с минимум изкривявания.

2. Петканален измерителен усилвател на сили.

В статията е дадено описание и техническите характеристики на петканален измерителен уред за измерване на сили. Уредът е разработен от Научно-изследователската лаборатория "Вибрации и шум в машините" при Технически университет – София.

В качеството на първични преобразуватели са използвани активни пиезоелектрични чувствителни елементи, които се вграждат в силовата верига на пътя на силовия поток.

Благодарение на използваните активни пиезоелектрични преобразуватели, дължината на съединителния кабел – между първичния преобразувател и входа на усилвателния канал, практически не оказва влияние. Това позволява измерването на съответните величини да се осъществява при голямо разстояние между обекта на

измерването и измерителната система – до няколкостотин метра. Работният обхват на измерваната входна величина е около $D = 10^4$. Тази особеност на използваните преобразуватели налага разработването на специална схема – на входа на измерителния усилвател, чието предназначение е да осигури необходимото постояннооточково захранване на пиезоелектричния преобразувател.

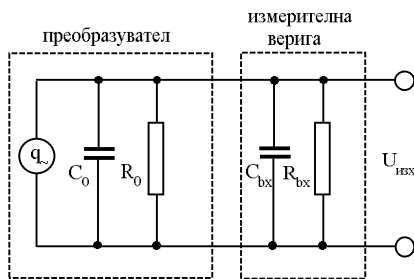
Уредът е комплектован с набор нискочестотни филтри от IV ред, допълнително разширяващи неговите възможности и кръгът на решаваните измерителни задачи.

Захранването на уреда е мрежово или автономно, от вграден в него акумулатор, осигуряващ 8- часова непрекъсната работа. Зареждането на акумулатора се осъществява чрез вградено в него зарядно устройство.

На фиг.3 е представена блоковата схема на един от петте измерителни канали.

Пиезоелектричен преобразувател.

Известно е, че изходната мощност на пиезоелектричните преобразуватели [8] е много малка, което налага те да бъдат включвани към измерителен усилвател с



Фиг.1

Изходното напрежение на преобразувателя, включен към измерителната верига, е

$$(1) \quad \dot{U}_{изх} = \dot{I} \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

При синусоидална сила, действаща на преобразувателя

$$P = F_m \sin \omega t,$$

моментната стойност на тока е

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(d_{11} F_m \sin \omega t)}{dt}, \quad (d_{11} - \text{пиезомодул}).$$

По такъв начин $\dot{I} = j\omega d_{11} \dot{F}$ и

$$(2) \quad \dot{U}_{изх} = d_{11} \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}.$$

Както се вижда от израза (2), амплитудата на напрежението и фазовото отместване между напрежението и измерваната сила, зависят от честотата:

$$(3) \quad U_{вх} = \frac{d_{11} F_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{ex} + C_0)^2}},$$

и

$$(4) \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg[\omega(C_{ex} + C_0)R].$$

От изразите (3) и (4) следва, че напрежението на изхода на усилвателя няма да зависи от честотата само при високи честоти, т.е.

$$\omega > \frac{1}{R(C_{ex} + C_0)},$$

и ще бъде равно на

много гламо входно съпротивление и това е един от основните техни недостатъци.

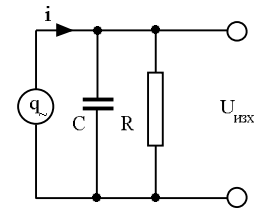
Еквивалентната схема на преобразувателя, свързан посредством кабел към измерителната верига, е представена на фиг.1. С C_0 е означен капацитетът между стените на пиезокристал /капацитет на преобразувателя/; C_{ex} - капацитет на свързващия кабел и входния капацитет на измерителната верига; R_0 - съпротивление на преобразувателя, при отчитане и на съпротивлението на изолацията на линията, спрямо масата; R_{ex} - входно съпротивление на измерителната верига.

Еквивалентната схема може да се опрости, съгласно фиг.2, където еквивалентното съпротивление е

$$R = R_0 R_{ex} / (R_0 + R_{ex}),$$

а капацитетът

$$C = C_0 + C_{ex}.$$



Фиг.2.

$$(5) \quad \dot{U}_{изх} = \frac{d_{11}F}{C_{вх} + C_0}.$$

Както се вижда от последния израз, изходното напрежение на преобразувателя зависи от капацитета на входната верига. При дълга съединителна линия този капацитет се формира основно от капацитета на съединителния кабел. Този недостатък може напълно да се отстрани, ако в качеството на първичен преобразувател се използва активен преобразувател. В този случай съединителния кабел е разположен вътре в самия преобразувател, при което може да се каже, че неговото влияние е практически напълно отстранено. По тази причина в настоящата разработка е използван активен пиезоелектричен акселерометър. Това обаче налага захранването му да се осъществи чрез генератор на ток, включен във входните вериги на всеки измерителен канал.

Генератор на ток.

Схемата се състои от основния транзистор T_2 и транзистора T_3 , който е диодно включен (базата и колектора на T_3 са свързани нахъсо) [6,7]. Токът през T_3 се определя от

$$\text{където } I_{C_3} = (I_{IV} - U_{BE_3}) / (R_2 + R_3), \text{ а } U_{BE_3} = 0,6 \dots 0,7V.$$

В динамичен режим изходното съпротивление R_{Leek} на преобразувателя се променя. Граничната стойност на изходното съпротивление до която токът I_{C_2} остава непроменен се определя от формулата

$$(7) \quad R_{LIT} = \frac{I_{IV} - U_{CE_{2sat}}}{I_{C_2}} - R_1.$$

За линеен режим на работа на генератора трябва да бъде изпълнено условието $R_{Leek} < R_{LIT}$.

Усилвател на напрежение.

Сигналят от пиезоелектричния преобразувател постъпва в усилвател на напрежение [3,6]. Включени са последователно два усилвателя, при което честотната характеристика е в обхвата $0,06Hz - 25kHz$, $-2dB$. Превключването на коефициента на усиление се осъществява чрез регулатори, разположени на лицеви панел на уреда. Грешката при установяването на коефициента на усиление е $<0,2\%$.

Максималният коефициент K на усиление, който се реализира с усилвателите е $46dB$. Съществува възможност за последователно включване на два измерителни канали, при което е възможно да се реализира максимален коефициент на усиление K^2 .

След втория усилвател на напрежение се осъществява контрол на премодулацията на измерителния сигнал. Контролира се нивото, както на положителната, така и на отрицателната полуълни – пикова стойност. Индикацията за премодулация се осъществява чрез сигнални светодиоди, които се активират при надвишаване на праговото ниво.

Комплект нискофестотни филтри.

потенциометъра R_3 . При това T_3 е включен така, че да компенсира изменението на напрежението U_{BE_2} на транзистора T_2 при изменението на околната температура.

Освен това резисторите R_1 и R_2 формират ООВ, така че изменението на емитерния ток на T_2 от температурата да води също до промяна на U_{BE_2} , от което се компенсира изменението на $I_{E_2} \approx I_{C_2}$. За генератора на ток може да се напише

$$(6a) \quad I_{E_2} R_1 + U_{BE_2} = I_{E_3} R_2 + U_{BE_3}.$$

Като се отчете, че $U_{BE_2} \approx U_{BE_3}$ и $I_{E_{2(3)}} \approx I_{C_{2(3)}}$ се получава

$$(6b) \quad I_{C_2} \approx \frac{R_2}{R_1} I_{C_3},$$

Във всеки от измервателните канали е включен набор нискофестотни филтри от IV ред [9,11], при стръмност на характеристиките $24dB/oct$. Реализирани са честоти на срязване $f_0 = 250Hz$ и $f_0 = 25kHz$, съответно.

Съществува и функция *lin*, при която АЧХ на измерителния канал е равномерна в номиналния честотен обхват на измерителния канал.

Захранващ блок.

Захранването на измервателния уред се осъществява по един от следните начини:

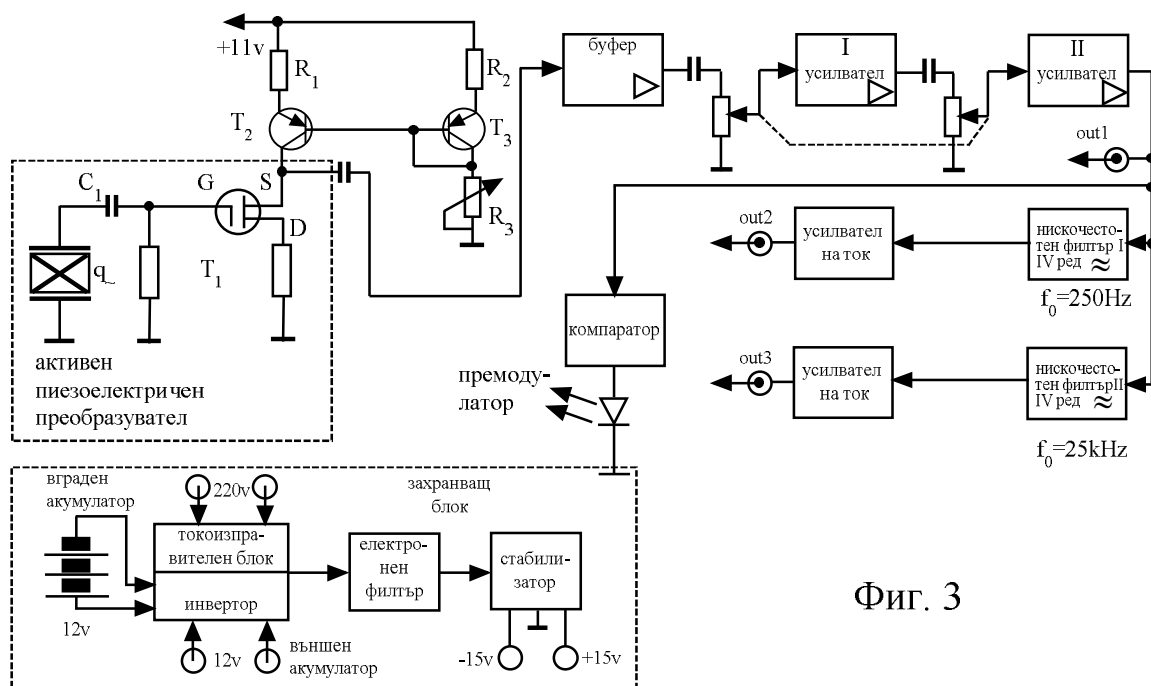
-мрежово захранване – $220V, \pm 10\%$;

-автономно захранване – $12V$ от вградения в уреда Са Ni акумулатор, осигуряващ 8-часово непрекъснато функциониране на уреда;

-външно захранване /външен акумулатор или батерии/ – $12-13,4V$;

В захранващия блок е използван DC/DC преобразувател, при честота на преобразуването $100kHz$. С включването на електронен филтър във веригата на захранването е постигната висока степен на филтрация [3] на пулсациите в захранващите напрежения. Последното звено изпълнява функцията “стабилизация” на двете захранващи напрежения $\pm 15V$.

На фиг.4 е показан общ изглед на уреда.



Фиг. 3



Фиг. 4.

2.1. Основни технически характеристики.

2.1.1. Входи.

- брой на каналите - 5;
- входно съпротивление - $> 500k\Omega$;
- обхват на измерваните сили /с пиезоакселерометър

DLC 101 / OMEGA/:

- максимална стойност на измерваните сили- 60 kg /588 N/;
- минимална измервана сила - ,005 kg /0,049 N/;
- чувствителност /с акселерометър DLC 101/- 13,35 mV/kg, /peak/;

$mV/N, /peak/;$

-частотен обхват - $0,06 \text{ Hz} - 25 \text{ kHz} /-2 \text{ dB/}$,
 $0,08 \text{ Hz} - 20$

$\text{kHz} /-0,5 \text{ dB/}$;

-коэффициенти на усиление - $x 1, x 5, x 20, x$
 $40, x 100, x 200;$

-грешка при установяване на коэффициента на
 усиление- $< \pm 0,2\%$;

-шумово ниво, 0-20 Hz- $< 0,002 \text{ mV rms};$

-стандарт на входящите куплунзи - $BNC;$

-защита срещу късо съединение на входовете - $da;$

2.1.2. Нискочестотни филтри – НЧФ.

- НЧФ - IV ред - /за всеки канал/ - $250 \text{ Hz}, 24$

$\text{dB/oct};$

-НЧФ - IV ред - /за всеки канал/ - $25 \text{ kHz}, 24 \text{ dB/oct};$

2.1.3. Изходи.

-изходно съпротивление - $200 \Omega ;$

-максимално ниво на изходния сигнал - $\pm 8 \text{ V /peak/};$

-коэффициент на нелинейни изкривявания – TDH - $<$

$0,1 \%$;

-индикация за премодуляция- $da, \text{светодиодна};$

-защита срещу късо съединение на изходите - $da;$

-стандарт на изходящите куплунзи - $BNC;$

2.1.4. Захранване.

-вид на захранването - $\text{мрежово и автономно};$

-захранване от мрежа - $220 \text{ V} \pm 10\%;$

-автономно захранване от вграден Ni-Cd акумулатор -

$12 \text{ V};$

-вход за захранване от външна батерия /акумулатор/ -

$da, 11-14,5 \text{ V};$

-времетраене на непрекъсната работа – в режим

«автономно захранване» - $\text{около } 8 \text{ часа};$

-консумирана мощност -

$1,6 \text{ W};$

2.1.5. Допустими климатични условия.

-обхват на работната температура - $-15 \text{ до } +45^{\circ} \text{ C};$

-максимална относителна влажност - 90% ;

2.1.6. Габаритни размери и маса.

-габаритни размери - 255

$x 95 x 215 \text{ mm};$

-маса /заедно с вградения акумулатор/

$1,6 \text{ kg};$

Комплектация на доставката:

1. Петканален измерителен усилвател за сили,
 с вграден Ni-Cd акумулатор $12 \text{ V} / 1 \text{ Ah}$ - 1 брой;

2. Мрежов AC- DC – адаптор 230181 A - 1 брой;

3. Зарядно устройство SYS-1308-2415-W2E 1 брой;

4. Системен кабел SC-BNC-3 - 10 броя;

5. BNC-BNC преходник - 5 броя;

6. Инструкция за експлоатация - 1 брой.

2.2. Инструкция за експлоатация.

На предния панел на уреда – фиг.4, са разположени органите за управление и входящите BNC куплунзи. Включването на уреда в режим «мрежово захранване» се осъществява посредством двупозиционен ключ, намиращ се долу-вляво на предния панел. Над него е разположен сигнален светодиод, който се активира при подведено захранване към уреда. Непосредствено до този ключ – вдясно се намира също двупозиционен ключ «BAT» за включване на захранването, при работа в режим «автономно захранване». Уредът може да се задейства само с единият от двата ключа. В случай, че и двата ключа са в положение «ON» /включено/ към уреда не постъпват захранващи напрежения.

Над сигналния светодиод за този ключ, е разположен друг светодиод «CHARGE», който индицира състоянието на захранващия акумулатор. При активирането на този светодиод акумулаторът трябва да бъде зареден. Прагът на задействане на сигналния светодиод е напрежение $10,8 \text{ V}$ на клемите на вградения акумулатор.

В дясно на захранващия блок са разположени пет идентични измерителни канали «CH1-CH5». Включването на акселерометрите се осъществява чрез BNC-входовете. Входовете изпълняват едновременно две функции:

-подвеждане на захранващи напрежение към акселерометрите- $11 \text{ V};$

-въвеждане в уреда на измерителните сигнали, постъпващи от акселерометрите.

Промяната на коэффициентите на усиление се осъществява посредством 6-позиционни галетни превключватели «GAIN», с възможност за установяване на следните коэффициенти на усиление: $x1, x5, x20, x40, x100, x200$.

Горе, вляво за всеки канал са разположени сигнални светодиоди «ERROR» /премодуляция/. Прагът на задействането им е $\pm 7 \text{ V} / peak /$, на изходното

напрежение, като се следи както положителната, така и отрицателната полуълна на измерителния сигнал. При активирането на този светодиод в процеса на измерването, е необходимо да се премине към по-нисък коэффициент на усиляването, чрез превключвателя «GAIN».

На задния панел на уреда – фиг. 4, са разположени: Двуполусен куплунг «POWER», предназначен за включването на мрежовия адаптор.

В ляво от куплунга «POWER» са разположени буксите «EXT BATTERY», посредством които уредът може да бъде захранван от външен постоянен ток източник $11-14,5 \text{ V}$ – акумулатор или обикновена батерия. При използването на този захранващ вход, при включването на външен постоянно-токов източник да се спазва означения на панела поляритет ! В случай на неправилно включване на външното захранване се задейства вътрешна диодна защита, при което предпазителят $0,6 \text{ A}$ прегаря.

Над буксите «EXT BATTERY» е разположен куплунг за включване на зарядното устройство, осигуряващо напрежение $15 \text{ V} / 1 \text{ A}$. За да се премине в режим «зареждане на акумулатора» е необходимо двупозиционния ключ да се приведе в състояние «ON», при което, разположеният до него сигнален светодиод се активира. След зареждането на акумулатора този ключ отново се привежда в състояние «OFF». Процесът на зареждане на акумулатора трае 5 часа .



Фиг. 5

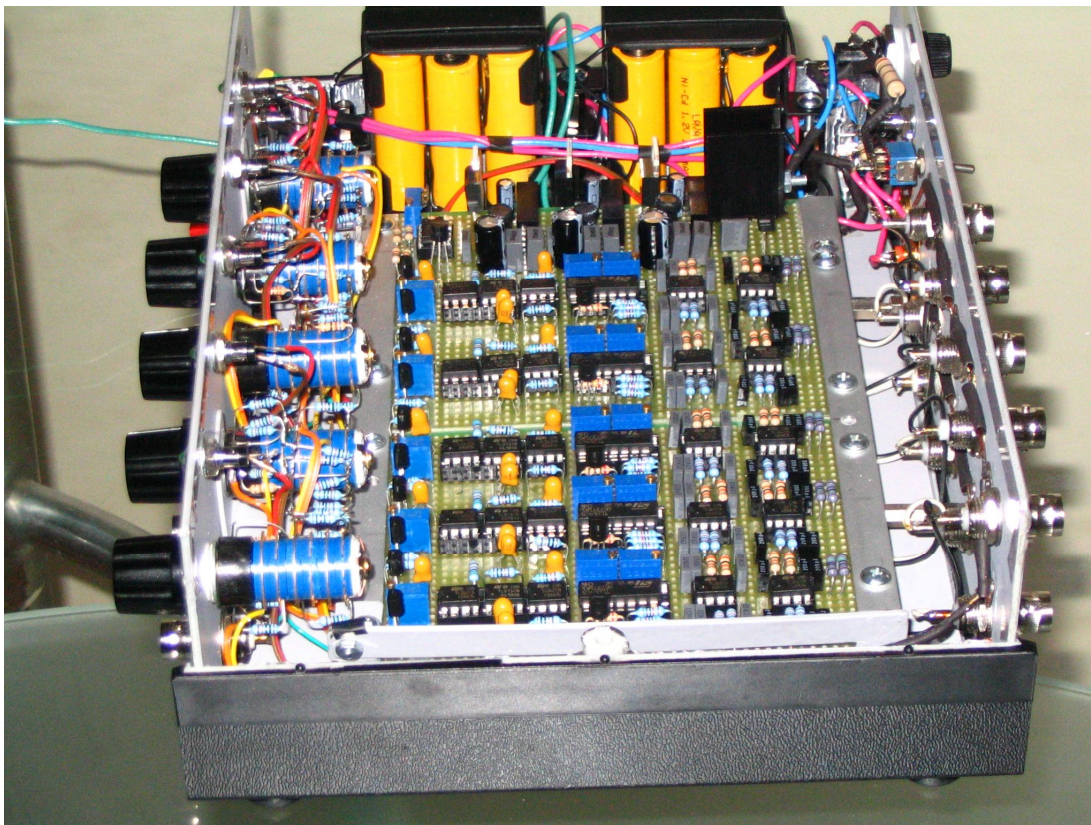
В ляво на захранващия блок на задния панел са разположени изходящите BNC – куплунзи. На горният ред изходящи куплунзи означени с “**250 Hz**”, се извеждат изходните сигнали в честотния обхват “**0,06 Hz-250 Hz**”, а на долния ред – в честотния обхват – “**0,06 Hz-25 kHz**”. Първият честотен обхват е предназначен – главно за измерване на стационарни процеси. Използването на втория се препоръчва при измерването на ударни процеси, за които е необходима широка честотна лента на възпроизвеждане на изследвания процес.

Вградените НЧФ от IV ред, при спад на честотните им характеристики 24 dB/oct са независими, така че измерителните информации и от двата изхода може да се използват едновременно.

Благодарение на специалните мерки, които са предприети при проектирането и разработването на захранването на уреда – въведени електронни стабилизатори на

напрежението, електронни филтри за изглаждане на пулсациите и др., включени НЧФ във всеки от каналите, както и на използването на прецизни интегрални схеми при изграждането му, е постигнат много широк динамичен обхват на измерителните канали – **90dB**. Благодарение на това с уреда може да се измерват много малки по стойност сили. Минималната измервана сила /с използването на акселерометър DLC 101/ е 5 g. Горната граница на стойността на измерваната сила се лимитира от якостните качества на използвания акселерометър, като в дадения случай тя е 60 kg. /При измерването на много малки по големина сили се препоръчва в качеството на отчитащо устройство да се използва осцилоскоп или чувствителен волтмер/.

На фиг.6 е показан общ изглед на разположението на градивните елементи на уреда, както и разположението на акумулатора.



Фиг. 6.

При работа с уреда - за измерване на сили се препоръчва следната последователност:

1. Възприемателят за сила се вгражда в механичната конструкция на пътя на силовия поток;

2. Посредством системния кабел SC-BNC-3 сигналът от възприемателя се подава на един от входовете на измерителния усилвател;

3. Включва се захранването на уреда. Едновременно с включването на уреда автоматично се подават и захранващите напрежения към акселерометрите. Вследствие на това, че във високоомната верига на вградения в акселерометра интегрален усилвател протичат преходни процеси, е необходимо да се изчака 30-40 s, след което уредът е готов за работа. Това изчакване е необходимо и когато се включва акселерометър, след като уредът предварително е приведен в работно състояние.

4. С помоща на превключвателя "GAIN" се установява оптимален коефициент на усилване на измерителния сигнал. За да се постигне това е необходимо сигналния светодиод "ERROR", да не е активиран;

5. С включения към съответния изход показващо устройство – волтмер, осцилоскоп, се отчита изходящото напрежение $U_{изх}$ [V].

Стойността на измерваната сила се определя със съотношението:

$$P = \frac{U_{изх}}{S.k} [N],$$

където S е чувствителността на използвания акселерометър. За акселерометър DLC 101, $S=0,00131$ V/N. k е установения коефициент на усилване с превключвателя "GAIN".

Пример: Отчетено е изходно напрежение $U_{изх} = 4,5V$, при коефициент на усилване $k=20$. Големината на измерената сила е:

$$P = \frac{4.5}{0,00131 \times 20} = 171.76 N.$$

Забележка: При отворени входове, т.е. когато на входа на даден канал не е включен акселерометър, съответния на него светодиод "ERROR", при значителна стойност на коефициента на усилване, се активира. Това води единствено до повишена консумация на енергия, което в режим «автономно захранване» не е желателно. За да се избягва това се препоръчва на неработещите в момента канали, превключвателите "GAIN" да се позиционират в положение - минимално усилване, т.е. $k=1$.

3. Заключение.

Разработеният петканален измерителен усилвател за измерване на сили, е с обхват на измерваните сили 0,05-600 N.

В качеството на първичен измерителен преобразувател се използва активен пиезоелектричен преобразувател, което позволява измерването да се осъществява при значителна дистанция от обекта на измерването. Уредът е снабден с необходимите функционални системи, които разширяват неговите възможности. Захранването е мрежово и автономно. Грешката при измерванията /за електрическите канали/ не надвишава 0,2%.

Основните приложения са: измерване на сили в областта на общото машиностроене, транспорта и транспортната техника, енергетиката, корабоплаване и авиация и др.

Уредът е разработен от Научно-изследователска лаборатория "Вибрации и шум в машините, при ТУ-София.

Внедрен е в изпитателна лаборатория за еквивалентни изпитвания на колесни транспортни средства на техни агрегати и елементи.

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2010 г.

4. Литература

1. Добрынин, С. А., М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. Москва, "Машиностроение", 1987.
2. Нуберт, Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Ленинград, "Энергия", 1970.
3. Начев, Н. Система за измерване и анализ на вибрационни и ударни процеси. София, Сп. "Машиностроене и машиностроителни технологии", кн.2, 2010.
4. Макаров, Р. А. Тензометрия в машиностроении. Москва, "Машиностроение", 1985.

5. Орнатский, П. П., Теоретические основы, измерительной техники. Киев, "Высшая ш кола", 1978.
6. Пандиев, И., Л. Донева, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника – ч. 1, 2. София, "ТУ – София", 2008.
7. Стоянов, И. Измерване на електрически и неелектрически величини. София, "Идея", 2006.
8. Турчин, А. М. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Ленинград, "Энергия", 1975.
9. Титце, У., К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. Москва, "Мир", 1982.
11. Glayton, G. Operational Amplifiers. "Butterworth - Henemann", 1996.
12. Horowitz, P., W. Hill. The Art Of Electronics. New York, "Harvard University", 2000.
13. Kennet G., Mc Connel, Paulo S. Varoto. Vibration Testing. Theory and Practice. "Wiley", 2008.