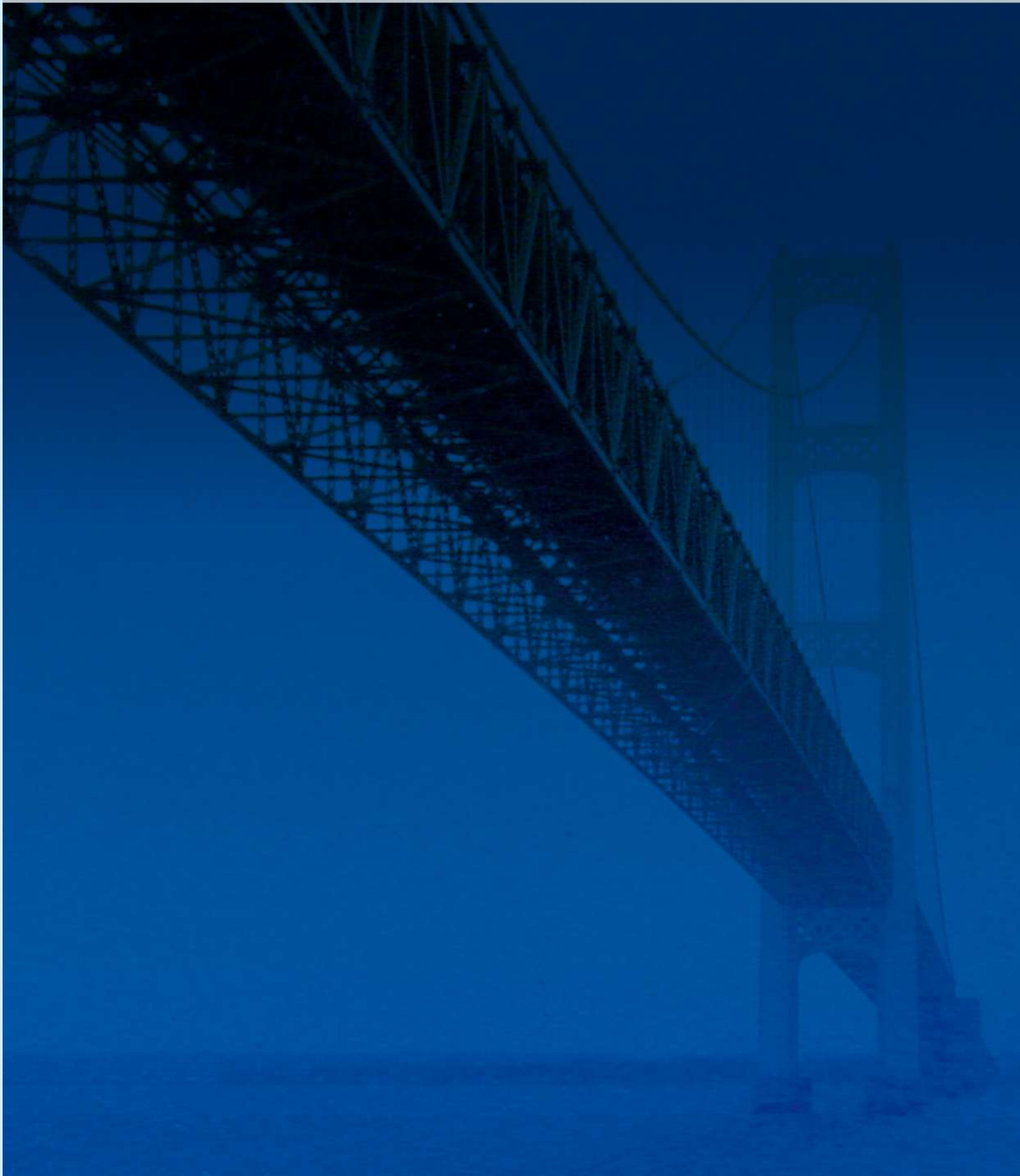


# TELECO

SHM SYSTEMS



## Il monitoraggio dinamico delle strutture

Il termine “danno” riferito ad una struttura definisce il verificarsi di situazioni che possono influenzare in maniera negativa il comportamento attuale o futuro di tale struttura. Questa definizione fa riferimento, in maniera implicita, ad una situazione iniziale di riferimento rappresentata dallo stato di integrità della struttura. Considerando strutture civili (edifici, ponti, viadotti, dighe ecc.) il concetto di danno è legato a variazioni delle proprietà dei materiali, della geometria delle parti o delle loro connessioni che possano pregiudicare il corretto modo di operare, della struttura considerata.

Non è detto, comunque, che una struttura danneggiata perda completamente e improvvisamente la propria funzionalità; opererà, piuttosto, in maniera non ottimale. La crescita di un danno iniziale può poi portare a situazioni non più accettabili per gli utenti; si parla allora di “crash” o “guasto totale” del sistema. I danni possono crescere lentamente nel tempo come avviene per i fenomeni di fatica o di corrosione dei materiali ma possono anche avere luogo in intervalli di tempo molto brevi come nel caso di esplosioni o di fenomeni naturali violenti come gli uragani o i terremoti.

L’implementazione di una strategia di rilevazione dei danni strutturali nei settori dell’ingegneria civile, meccanica e aerospaziale viene definita “Structural Health Monitoring” (SHM) e può venire tradotta come “monitoraggio della integrità delle strutture”. Una strategia di SHM richiede l’osservazione della struttura durante un certo intervallo di tempo durante il quale effettuare misure che consentano di dedurre la presenza di eventuali danni. Procedure statiche di questo tipo vengono applicate da molto tempo e sono essenzialmente basate sulla rilevazione, mediante opportuni sensori (estensimetri) delle variazioni che possono subentrare e nella geometria di una struttura.



Nelle strutture moderne ad elevato sviluppo verticale i sistemi SHM vengono previsti a livello progettuale. Modern tall building designs include SHM systems.

Tali procedure, pur valide, possono talvolta fornire indicazioni tardive o parziali, poco conciliabili con la programmazione di interventi tempestivi di manutenzione. Una maggiore affidabilità si ottiene con misure di tipo dinamico cioè effettuate con una adeguata frequenza (es. 50 volte al secondo) che consentano di costruire modelli matematici in grado di descrivere e il comporta-

mento dinamico delle strutture. L’aggiornamento in tempo reale di tali modelli ed il loro confronto con i modelli di riferimento, costruiti nella situazione iniziale di struttura integra, consente di rilevare, quantificare e localizzare gli inevitabili degradi dovuti all’invecchiamento e all’usura. Nel caso di eventi estremi come esplosioni o terremoti, le metodologie SHM possono poi consentire una rapida classificazione dell’entità dei danni subiti dalle strutture per valutare in tempi brevi quali possano venire ancora utilizzate e con quali limiti operativi (ad esempio, un ponte potrebbe risultare utilizzabile solo con opportune limitazioni di carico).

## Dynamical structural health monitoring

The word “damage”, when used with reference to structures, describes situations that can influence in an adverse way their actual or future behavior. Such a definition makes implicitly reference to an initial state of integrity of the considered structure. When civil structures like buildings, bridges, dams etc. are considered, the concept of damage is associated with variations in the properties of materials, in the geometry of single parts or in that of their interconnections with entities that can prevent the expected performance.

Usually, however, the presence of damages does not lead to the sudden and complete failure of a structure; it will, more frequently, lead to a non optimal behavior. A damage can then evolve towards non acceptable conditions i.e. towards a “crash” or “total failure” of the whole system. The evolution of damages can be slow as happens when fatigue or corrosion phenomena are involved but can also concern short time intervals as it happens when explosions, earthquakes or hurricanes are involved.

The implementation of strategies leading to detect the presence of structural faults in the area of civil, mechanical and aerospace engineering is described with the locution “Structural Health Monitoring” (SHM). These strategies require monitoring the considered structure during a proper time interval in order to perform measures suitable for evaluating the possible presence of damages. Procedures of this kind, based on static measures, are being applied from many years and are essentially based on the measure, by means of suitable strain gauges, of variations in the geometry of a structure. These procedures can be effective but, sometimes, can lead to late or partial evaluations unsuitable for the design of timely maintenance interventions.

More reliable results can be obtained by performing dynamical measures i.e. measures repeated with a suitable frequency (e.g. 50 times per second) in order to extract mathematical models describing the dynamical behavior of the considered structure. The real-time update of these models and their comparison with reference models obtained in the initial state of structural integrity allows to detect, quantify and localize the inevitable deteriorations due to ageing and wear. In case of extreme phenomena like explosions or earthquakes SHM methodologies allow fast evaluations of structural damages and equally fast decisions about their use (a bridge, for instance, could be still usable but with load limitations).

## L'evoluzione delle tecnologie SHM

Qualunque struttura produttiva, privata o pubblica, è interessata ad individuare il prima possibile i difetti e i danni presenti nei suoi prodotti o nelle sue infrastrutture, sia per motivi economici che di sicurezza operativa degli impianti e questo richiede l'uso di metodologie SHM. Nel settore dell'ingegneria civile l'applicazione di tecnologie SHM consente una valutazione affidabile dei danni subiti dalle strutture sottoposte ad eventi sismici e quindi di determinare se è possibile riutilizzare in condizioni di sicurezza un edificio dopo un terremoto. La rapida riutilizzazione degli edifici destinati ad attività produttive può ridurre in maniera significativa i danni economici causati dai terremoti, quella degli edifici pubblici può ridurre sensibilmente i disagi sociali.



Un tipico accelerometro piezoelettrico usato nei sistemi SHM tradizionali.  
A typical piezoelectric accelerometer used in traditional SHM systems.

E' poi importante osservare che molte infrastrutture, in particolare ponti, sono state realizzate nel secolo scorso e stanno raggiungendo o hanno già superato le aspettative iniziali di vita utile; per motivi economici queste strutture continuano a venire utilizzate nonostante l'usura e il loro monitoraggio sta diventando sempre più importante ed urgente sotto il profilo della sicurezza. La sicurezza ed i benefici economici associati ad una filosofia di questo tipo possono, ovviamente, venire acquisiti solo se il sistema di monitoraggio è in grado di avvertire del danno presente prima che la sua evoluzione porti ad un crash. Questa esigenza fondamentale richiede un monitoraggio mediante hardware adeguato ed una analisi dei dati altrettanto efficace.

La valutazione dei danni a ponti ed edifici sulla base della rilevazione delle loro vibrazioni ha cominciato ad essere applicata a partire dall'inizio degli anni '80. Le proprietà modali e quelle che derivano da tali proprietà come la matrice degli indici di flessibilità dinamica sono state le prime caratteristiche utilizzate per individuare i danni nei ponti. E' interessante osservare come i regolamenti in vigore in molti paesi richiedano che i costruttori di ponti certifichino periodicamente lo stato di queste strutture e questo ha portato a sistemi SHM sviluppati in maniera specifica per tali strutture. L'evoluzione delle attuali possibilità dell'SHM è legata ad approcci necessariamente multidisciplinari che si appoggiano a svariate competenze nei settori dell'ingegneria civile, meccanica, informatica, elettronica, dell'automazione ed in quello dell'identificazione dei sistemi dinamici che rende disponibili le metodologie matematiche necessarie per costruire modelli sulla base delle misure effettuate sulle strutture.

## Evolution of SHM methodologies

All private or public production firms are interested in detecting, as soon as possible, defects and damages in their products or in production infrastructures for both economic and safety reasons and this requires the use of SHM methodologies. In the civil engineering area the use of SHM technologies allows a reliable evaluation of the damages due to seismic events and thus to decide about the possibility of avoiding interruptions in the use of buildings. The fast reuse of production facilities can reduce in a significant way economic losses while the availability of public buildings mitigates the social discomfort inevitably associated with these events.

It is also important to observe that many infrastructures, particularly bridges, have been constructed during the last century and are approaching or have exceeded their initial expectations of operative life; economic factors suggest extensions in their use despite wear so that their monitoring is of increasing importance from the safety viewpoint. Safety and the economic benefits deriving from a more focused maintenance can be achieved only when the monitoring system allows early warnings, much before the possibility of crashes. This requires the use of reliable and self-testing hardware solutions and equally reliable software for the analysis of the collected data.

The evaluation of damages to bridges and buildings on the basis of acceleration measures dates back to the '80. The modal properties and associated parameters (like the matrix of dynamic flexibility indices) have been the first information used in the evaluation of bridge faults.



I ponti costituiscono le strutture più frequentemente monitorate mediante sistemi SHM. Bridges are frequently monitored by means of SHM systems.

It is worth observing that in many countries bridge builders must submit periodic certifications concerning the state of the structures and this has led to the implementation of specific SHM systems. The development of SHM technologies is necessarily linked to an extended range of tools developed in the context of civil engineering, mechanics, informatics, electronics, automation and dynamic system identification that allows constructing dynamical models on the only basis of the performed measures.

## Caratteristiche desiderabili nei sistemi SHM

I sistemi SHM attuali sono tipicamente costituiti da sensori piezoelettrici (accelerometri) monoassiali progettati per applicazioni di rilevamento sismico. Si tratta di sensori con una buona sensibilità e basso rumore, del tutto idonei per applicazioni SHM. Tali sensori tuttavia presentano una serie di limitazioni dovute essenzialmente al costo elevato, ad un segnale di uscita analogico (che richiede un adeguato trattamento e conversione del segnale) e ad alta impedenza (che limita il collegamento a distanze non troppo elevate a causa dei disturbi raccolti dalla linea di connessione).

I sensori risultano poi collegati ad amplificatori ad elevata impedenza di ingresso, basso rumore ed elevata dinamica ed a convertitori analogico/digitali a loro volta connessi ad un data logger che memorizza le rilevazioni. Sistemi di questo tipo risultano costosi, poco flessibili (poco adatti, ad esempio, per installazioni su manufatti di notevole estensione come grandi edifici o ponti), privi di algoritmi di compressione dei dati (generano quindi rapidamente moli molto elevate di informazioni) e privi anche di software in grado di informare in maniera sintetica l'utente finale di variazioni rilevate sulle strutture monitorate. La valutazione dello stato di salute delle strutture resta quindi affidata a specialisti in grado di estrarre dalle misure memorizzate le informazioni rilevanti. Non è infrequente, nelle installazioni relative ad edifici, assistere ad un accumulo di quantitativi ingenti di dati che la mancanza di fondi per la loro analisi rende inutilizzati.

Architetture hardware e software più avanzate sono oggi possibili ma pur se analizzate a livello di ricerca effettuata negli ambienti accademici, non sono ancora disponibili in prodotti industriali. Un sistema SHM ottimale dovrebbe essere basato su sensori dotati delle seguenti caratteristiche:

- Misurazione su due o tre assi.
- Uscita digitale, in grado di consentire connessioni affidabili anche su distanze elevate.
- Connessione mediante bus evitando i costosi e invasivi collegamenti radiali tra l'unità di controllo ed i singoli sensori.
- Unità di elaborazione interna in grado di gestire la trasmissione dei dati, la verifica del corretto funzionamento e la disinserzione in caso di malfunzionamenti.
- Elaborazione locale dei dati in modo da inviare, anziché una mole molto elevata di dati grezzi, le informazioni utili contenute in tali dati (es. spettro di potenza dei segnali).

L'unità di acquisizione dati, controllo e data logging dovrebbe poi essere in grado di:

- Acquisire misure sincronizzate dai vari sensori per consentire la costruzione di modelli dinamici multivariabili globali in grado di rilevare non solo i danni locali ma anche quelli nelle interconnessioni dei vari elementi strutturali.

Un sistema dotato delle caratteristiche precedenti, come il Teleco SHM602, può svincolarsi da molti dei limiti dei sistemi tradizionali e prevedere un numero di sensori relativamente elevato senza sconfinare in costi elevati ed eccessive difficoltà di installazione anche in edifici storici privi di predisposizioni.

## Desirable features in SHM systems

The SHM systems currently installed rely, typically, on single-axis piezoelectric accelerometers designed for seismic applications. These sensors, characterized by good sensitivity and low noise, are perfectly suitable for SHM applications. They are, however, also afflicted by limits like high cost, analog output (that requires a proper signal treatment and conversion), high output impedance (that limits the length of the connecting

cables and can lead to the introduction of disturbances). The accelerometers are connected to high impedance high-dynamics low-noise amplifiers followed by analog/digital converters connected to a data logger that stores, with a predefined sampling rate, the measures.

Systems with a structure of this type are expensive, have a limited degree of flexibility (they are only marginally suitable for extended structures like bridges or long buildings), are not endowed with local data compression algorithms (and generate very large amounts of data also in short time intervals) and lack also software packages suitable for a fast on-line analysis of the status of the monitored structures. This last evaluation is thus usually delegated to external specialists and it is not uncommon to see installations that have produced large amounts of data that have never been analyzed.

More advanced hardware and software platforms have been developed in academic contexts but have not yet been implemented into commercial products. An optimal SHM system should rely on sensors (accelerometers) endowed with the following features:

- Measures on two or three axes.
- Digital output in order to avoid signal degradation over long distances.
- Interconnections via digital bus to avoid invasive radial connections between every sensor and the control unit.
- Local computational capability to manage self-tests, transmission protocols and disconnection in case of faults.
- Local data elaboration in order to send, instead of a large flux of raw data, compact models retaining all useful information (e.g. signal power spectra).

The control and data logging unit, in turn, should have the following capabilities:

- Acquisition of synchronized measures from all sensors to allow the identification of multivariable dynamic models suitable for detecting not only local damages but also the damages affecting the interconnections of structural components.

Systems endowed with all previous features, like Teleco SHM602, can overcome most limits of traditional systems and implement all sensors necessary to get a complete situational awareness without reaching prohibitive costs. The possibility of installing an high number of sensors over the same bus greatly simplifies the installation also in old buildings where severe rules concerning the installation of new hardware are present.



Molti ponti (in figura quello di Brooklyn) hanno più di un secolo di vita. Many bridges, like the Brooklyn one, are more than one century old.

## SHM602 Structural Health Monitoring System



SHM602 è un sistema integrato avanzato per il monitoraggio strutturale dinamico (SHM, Structural Health Monitoring) di edifici e strutture civili ed industriali attraverso l'analisi della risposta di tali strutture a sollecitazioni naturali (traffico, azione del vento) o artificiali. Diversamente dai sistemi tradizionali, basati su costosi sensori analogici di tipo sismico e su invasive connessioni radiali con l'unità di controllo, l'SHM602 utilizza tecnologie digitali ed un collegamento ai sensori tramite bus con vantaggi economici, di affidabilità e di insensibilità ai disturbi elettromagnetici. L'SHM602, sviluppato da Teleco SHM Systems in collaborazione con l'Università di Bologna, si avvale di algoritmi e tecnologie proprietari ed è composto da:

### Centralina TSD10

- Display: Touch Screen 10"
- Temperatura di funzionamento: 0°C +70°C
- Umidità: 0 – 85% (senza condensa)
- Consumo: 12W
- Porte: USB, CF, Ethernet 100Mb, RS232
- Bus: 2 bus seriali RS485
- Numero Massimo di sensori su ogni bus: 16@20Hz, 8@40Hz, 4@80Hz

### Alimentatore di backup TSP02

- Configurabile in base alle esigenze dell'utente

### Sensori TSM02

- Temperatura di funzionamento: -20°C +80°C
- Umidità: 0 – 95% (senza condensa)
- Livello di protezione ambientale: IP67
- Range di rilevazione (accelerazione):  $\pm 1500$  mg (due assi)
- Rumore di fondo:  $\sigma = 0.32$  mg @ 20 Hz
- Range di rilevazione (temperatura): -20°C +80°C
- Collegamento: Tramite bus RS485

### Software di configurazione e acquisizione TBH02

- Selezione della frequenza di campionamento (20/40/80 Hz)
- Start/Stop acquisizione dati
- Monitoraggio di eventuali errori di acquisizione

SHM602 is an advanced integrated system for structural health monitoring (SHM) of buildings and civil structures based on the analysis of the response of these structures to environmental (traffic or wind action) or artificial excitations. Differently from traditional systems, based on expensive seismic analog transducers and on invasive radial connections with the control unit, the SHM602 relies on digital technologies and on bus connections of the sensors that assure an high degree of reliability and of insensitivity to electromagnetic interferences. The SHM602 has been developed by Teleco SHM Systems in cooperation with Bologna University and relies on proprietary technologies and algorithms. The system is composed by:

### Storage and Control Unit TSD10

- Display: Touch Screen 10"
- Operating temperature: 0°C +70°C
- Operating humidity: 0 – 85% (non-condensing)
- Consumption: 12W
- Ports: USB, CF, Ethernet 100Mb, RS232
- Bus: 2 RS485 buses
- Max. number of sensors on every bus: 16@20Hz, 8@40Hz, 4@80Hz

### Backup power supply TSP02

- Configurabile according to specific application requirements

### Sensors TSM02

- Operating temperature: -20°C +80°C
- Operating humidity: 0 – 95% (non-condensing)
- Environment protection level: IP67
- Acceleration range:  $\pm 1500$  mg (two axes)
- Noise:  $\sigma = 0.32$  mg @ 20 Hz
- Temperature measurement range: -20°C +80°C
- Interface: RS485 bus

### Configuration and data acquisition software TBH02

- Selection of the sample frequency (20/40/80 Hz)
- Start/Stop of data acquisition
- Monitoring of acquisition errors



### Caratteristiche

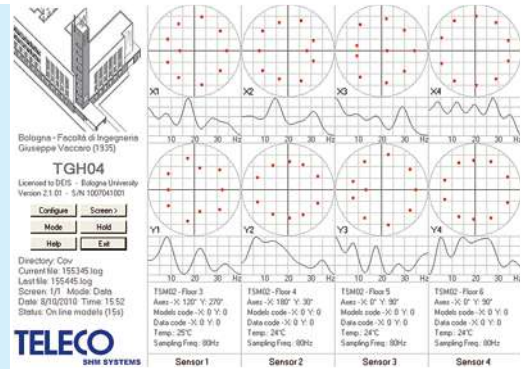
- Sensori dotati di capacità di calcolo locale ed in grado di effettuare l'identificazione di modelli dinamici
- Collegamento dei sensori alla centralina di controllo tramite bus RS485
- Frequenza di campionamento selezionabile tra 20 e 80 Hz
- Logging di accelerazioni, temperature e modelli
- Accesso ai dati ed ai modelli anche in maniera remota via Internet
- Visualizzazione in tempo reale dei poli dei modelli identificati e dello spettro di potenza dei segnali
- In grado di costruire modelli dinamici di edifici sottoposti a sollecitazioni naturali (traffico, azione del vento)

### Applicazioni

- Monitoraggio continuo della integrità strutturale di edifici, ponti ed altre strutture civili ed industriali
- Analisi della integrità delle strutture dopo eventi sismici

### Software di analisi e visualizzazione TGH04

- Calcolo dello spettro di potenza dei segnali acquisiti
- Visualizzazione dei poli dei modelli identificati
- Visualizzazione dello spettro di potenza dei segnali
- Visualizzazione della allocazione dei sensori nella struttura
- Analisi della affidabilità dei modelli
- Analisi della idoneità delle condizioni di eccitazione della struttura
- Confronto delle frequenze rilevate con quelle di riferimento



### Features

- Sensors endowed with local computational capabilities for the identification of dynamic models
- Connection with the central control and storage unit by means of RS485 bus
- Sampling frequency selectable between 20 and 80 Hz
- Logging of accelerations, temperatures and models
- Access to recorded data and models also via Internet
- Real-time visualization of the identified model poles and of the power spectra of the signals
- Identification of dynamic models of structures on the basis of environmental excitations (traffic, wind action).

### Applications

- Continuous monitoring of the structural integrity of buildings, bridges and other civil and industrial structures
- Evaluation of the integrity of structures after seismic events.

### Analysis and visualization software TGH04

- Computation of the power spectrum of the measured signals
- Visualization of the poles of the identified models
- Visualization of the power spectrum of the signals
- Visualization of the sensors allocation
- Analysis of the reliability of the models
- Analysis of the suitability of the structure excitation
- Comparison of the measured frequencies with reference ones