

# POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



## DIAGNOSTICA DI CUSCINETTI VOLVENTI MEDIANTE SIGNAL PROCESSING DI SEGNALI DI VIBRAZIONE, CORRENTE E TENSIONE

Relatore: Ch. mo Prof. Paolo PENNACCHI

Correlatore: Ing. Roberto RICCI

Tesi di laurea di:

Marco COPPALONI

Matr. 734427

Massimiliano PANZARASA

Matr. 734105

Anno Accademico 2010 – 2011



## **Ringraziamenti**

Vorremmo ringraziare il Prof. Paolo Pennacchi, relatore di questa tesi di laurea e l'Ing. Roberto Ricci per il preziosissimo aiuto gentilmente offertoci durante lo svolgimento delle prove di questa tesi e la stesura della stessa.

Max e Marco



# Indice

Indice.....	I
Indice delle figure .....	V
Indice delle tabelle .....	XIII
SOMMARIO.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUZIONE .....	5
1.1. Costi di manutenzione .....	5
1.2. Politiche di manutenzione .....	6
1.3. Manutenzione dei cuscinetti .....	8
1.4. Obiettivo e sviluppo della tesi .....	11
2. DIAGNOSTICA SU CUSCINETTI VOLVENTI: STATO DELL'ARTE	13
2.1. Frequenze caratteristiche del malfunzionamento dei cuscinetti in segnali di vibrazione .....	14
2.1.1. Difetto sulla pista interna .....	14
2.1.2. Difetto sulla pista esterna .....	15
2.1.3. Difetto sull'elemento volvente .....	16
2.1.4. Difetto sulla gabbia .....	17
2.2. Frequenze caratteristiche del malfunzionamento dei cuscinetti in segnali di corrente .....	17
2.2.1. Definizione basata sulla variazione del gap .....	18
2.2.2. Definizione basata sulla variazione della coppia .....	20
2.3. Tecniche di analisi dei segnali.....	23
2.3.1. Analisi nel dominio della magnitudo .....	23
2.3.2. Analisi nel dominio del tempo .....	25
2.3.3. Analisi nel dominio delle frequenze .....	26
2.3.4. Analisi nel dominio misto tempo-frequenza .....	26
2.3.4.1. Short Time Fourier Transform e Trasformata Wavelet .....	26

2.3.4.2.	Envelope Analysis .....	29
2.3.4.3.	Empirical Mode Decomposition e Hilbert-Huang Transform .. .....	30
2.3.4.4.	Spectral Kurtosis .....	31
3.	DESCRIZIONE DEL BANCO PROVA PER LA DIAGNOSTICA DEL SISTEMA DI TRAZIONE DEL TRENO AD ALTA VELOCITA' .....	37
3.1.	Strumentazione del banco prova .....	38
3.2.	Tipologia di cuscinetti montati sul banco .....	41
3.3.	Tipologia dei test effettuati .....	43
3.4.	Danneggiamento dei cuscinetti .....	45
3.5.	Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione.....	49
3.6.	Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente	50
4.	ANALISI DEI DATI DEL BANCO PROVA PER IL SISTEMA DI TRAZIONE DEL TRENO AD ALTA VELOCITA' .....	51
4.1.	Analisi dei dati di vibrazione .....	51
4.1.1.	Test di riferimento: TST 00 .....	53
4.1.2.	Difetto sull'anello interno: TST 02 .....	59
4.1.3.	Difetto su di un elemento volvente: TST 04.....	61
4.1.4.	Difetto dovuto ad un aumento del gioco assiale: TST 07.....	62
4.1.5.	Difetto dovuto ad ossidazione di tutti gli elementi: TST 08.....	64
4.1.6.	Difetto sull'elemento volvente: TST 12 .....	66
4.1.7.	Difetto sull'elemento volvente: TST 13 .....	68
4.1.8.	Difetto sulla gabbia: TST 14.....	70
4.1.9.	Difetto sull'anello interno: TST 16 .....	71
4.1.10.	Difetto sull'anello interno: TST 25.....	73
4.1.11.	Difetto sull'anello esterno: TST 26.....	74
4.1.12.	Difetto sull'anello esterno: TST 32.....	76
4.1.13.	Difetto sull'anello esterno: TST 35.....	77
4.1.14.	Difetto sull'elemento volvente: TST 36.....	79
4.1.15.	Difetto sull'anello interno: TST 38.....	81

4.1.16.	Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di vibrazione .....	83
4.2.	Analisi dei dati di tensione e corrente .....	85
4.2.1.	<i>Empirical Mode Decomposition</i> seguita da <i>Fourier Transform</i> ...	86
4.2.2.	<i>Empirical Mode Decomposition</i> seguita da <i>Envelope Analysis</i> ....	89
4.2.3.	<i>Empirical Mode Decomposition</i> seguita da <i>Spectral Kurtosis</i> .....	93
4.2.4.	Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di tensione e corrente .....	97
5.	DESCRIZIONE DEL BANCO PROVA DA LABORATORIO .....	99
5.1.	Strumentazione del banco prova .....	100
5.2.	Tipologia di cuscinetti utilizzati .....	104
5.3.	Tipologia dei test effettuati.....	105
5.4.	Danneggiamento dei cuscinetti.....	107
5.5.	Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione .....	108
5.6.	Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente..... .....	109
6.	ANALISI DEI DATI DEL BANCO PROVA DA LABORATORIO .....	111
6.1.	Analisi dei dati di vibrazione.....	111
6.1.1.	Test di riferimento: test 1 .....	111
6.1.2.	Difetto sulla pista esterna: test 2 .....	117
6.1.3.	Difetto sulla pista esterna: test 3 .....	119
6.1.4.	Difetto sulla pista interna: test 4.....	121
6.1.5.	Difetto sulla pista interna: test 5.....	122
6.1.6.	Difetto sull'elemento volvente: test 6 .....	124
6.1.7.	Difetto sugli elementi volventi: test 7 .....	125
6.1.8.	Difetti su entrambi i cuscinetti: test 8 .....	127
6.1.9.	Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di vibrazione.....	128
6.2.	Analisi dei dati di tensione e di corrente .....	129
6.2.1.	Test di riferimento: test 1 .....	129
6.2.2.	Difetto sulla pista esterna: test 2 .....	134
6.2.3.	Difetto sulla pista esterna: test 3 .....	135
6.2.4.	Difetto sulla pista interna: test 4.....	137

6.2.5.	Difetto sulla pista interna: test 5 .....	139
6.2.6.	Difetto sull'elemento volvente: test 6.....	140
6.2.7.	Difetto sugli elementi volventi: test 7.....	142
6.2.8.	Difetti su entrambi i cuscinetti: test 8.....	143
6.2.9.	Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di tensione e corrente....	145
6.3.	Analisi del valore RMS dei segnali di vibrazione e di corrente.....	146
7.	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI .....	149
	ALLEGATO A.....	155
	A1. Trasduttore di corrente LEM HAS 50 – S. ....	155
	A2. Trasduttore di tensione LEM LV 25-1000.....	155
	A3. Accelerometro Wilcoxon Research 786A. ....	156
	Nomenclatura e lista degli acronimi .....	157
	BIBLIOGRAFIA .....	161
	SITI INTERNET .....	163



## Indice delle figure

Figura 1.1 Andamento dei costi di manutenzione.....	5
Figura 1.2 Vista di una pompa centrifuga.....	9
Figura 1.3 Vista di un albero a gomiti di motore endotermico.....	9
Figura 1.4 Vista di una trasmissione a ruote coniche a denti elicoidali.....	10
Figura 1.5 Vista di un rotore di un motore elettrico.....	10
Figura 2.1 Tipici danneggiamenti sulla pista interna.....	15
Figura 2.2 Tipico danneggiamento sulla pista esterna.....	16
Figura 2.3 Tipico danneggiamento sull'elemento volvente.....	16
Figura 2.4 Tipico danneggiamento sulla gabbia di un cuscinetto volvente.....	17
Figura 2.5 Movimento radiale del rotore dovuto ad un difetto sulla pista esterna [21].....	20
Figura 2.6 Movimento radiale del rotore dovuto ad un difetto sulla pista interna [21].....	20
Figura 2.7 Spettrogramma.....	27
Figura 2.8 Effetto del fattore di scala sulla <i>mother wavelet</i> .....	28
Figura 2.9 Esempio di decomposizione EMD su un segnale di corrente.....	30
Figura 2.10 Kurtogram.....	36
Figura 3.1 Banco prova per la simulazione del sistema di trazione del treno ad alta velocità.....	37
Figura 3.2 Ulteriore vista del banco prova.....	38
Figura 3.3 Posizionamento dei sensori sul sistema di trazione.....	40
Figura 3.4 Posizione e codifica dei cuscinetti.....	41
Figura 3.5 Profilo di velocità.....	43
Figura 4.1 <i>Kurtogram</i> .....	52
Figura 4.2 Spettro del segnale di corrente ottenuto applicando direttamente la SK.....	52
Figura 4.3 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S23-A).....	53
Figura 4.4 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 05, canale S24-A).....	54
Figura 4.5 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S17-A).....	54
Figura 4.6 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S26-AT1).....	55
Figura 4.7 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S18-A).....	55
Figura 4.8 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S04-A).....	56

Figura 4.9 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S05-AD).....	56
Figura 4.10 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S27-AT1).....	57
Figura 4.11 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 04, canale S28-AT3).....	57
Figura 4.12 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S29-AT2).....	58
Figura 4.13 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S29-AT3).....	58
Figura 4.14 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 01, canale S29-AT3).....	59
Figura 4.15 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 04, canale S05-AD).....	60
Figura 4.16 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 05, canale S05-AD).....	60
Figura 4.17 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 04 - T 01, canale S27-AT1).....	61
Figura 4.18 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 04 - T 01, canale S29-AT2).....	62
Figura 4.19 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 01, canale S29-AT2).....	63
Figura 4.20 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 04, canale S27-AT2).....	63
Figura 4.21 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 05, canale S29-AT2).....	64
Figura 4.22 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 05, canale S04-A).....	65
Figura 4.23 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 12, canale S04-A).....	65
Figura 4.24 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 12, canale S29-AT2).....	66
Figura 4.25 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 12 - T 05, canale S05-AD).....	67
Figura 4.26 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 12 - T 12, canale S29-AT2).....	67
Figura 4.27 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 01, canale S05-AD).....	68
Figura 4.28 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 05, canale S04-A).....	69
Figura 4.29 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 12, canale S29-AT2).....	69

Figura 4.30 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 14 - T 05, canale S04-A).	70
Figura 4.31 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 14 - T 05, canale S05-AD).	71
Figura 4.32 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 16 - T 01, canale S05-AD).	72
Figura 4.33 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 16 - T 04, canale S28-AT3).	72
Figura 4.34 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 25 - T 04, canale S17-A).	73
Figura 4.35 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 25 - T 05, canale S26-AT1).	74
Figura 4.36 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 26 - T 12, canale S17-A).	75
Figura 4.37 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 26 - T 12, canale S26-AT1).	75
Figura 4.38 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 32 - T 01, canale S26-AT1).	76
Figura 4.39 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 32 - T 12, canale S18-A).	77
Figura 4.40 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 35 - T 05, canale S24-A).	78
Figura 4.41 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 35 - T 12, canale S24-A).	78
Figura 4.42 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 - T 01, canale S23-A).	79
Figura 4.43 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 T 04, canale S26-AT1).	80
Figura 4.44 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 - T 12, canale S23-A).	80
Figura 4.45 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 38 - T 01, canale S23-A).	81
Figura 4.46 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 38 - T 05, canale S23-A).	82
Figura 4.47 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + FT.	86
Figura 4.48 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + FT.	86
Figura 4.49 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + FT.	87
Figura 4.50 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + FT.	87
Figura 4.51 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + FT.	87
Figura 4.52 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + FT.	88
Figura 4.53 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + EA.	89

Figura 4.54 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + EA.	90
Figura 4.55 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + EA.	90
Figura 4.56 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 2, EMD + EA.	91
Figura 4.57 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 2, EMD + EA.	91
Figura 4.58 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + EA.	92
Figura 4.59 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + SK.	93
Figura 4.60 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 2, EMD + SK.	94
Figura 4.61 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + SK.	94
Figura 4.62 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + SK.	95
Figura 4.63 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + SK.	95
Figura 4.64 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + SK.	96
Figura 5.1 Banco prova del laboratorio del Politecnico di Milano – sede di Piacenza.	99
Figura 5.2 Posizionamento degli accelerometri.	101
Figura 5.3 Scatola di derivazione posta sul motore da cui sono state estratte le fasi del motore.	101
Figura 5.4 Sensore di corrente ad effetto <i>Hall</i> posto in prossimità del bordo del banco prova.	102
Figura 5.5 Sensore di tensione posto sul banco prova.	102
Figura 5.6 Interfaccia del software di acquisizione.	103
Figura 5.7 Caratteristiche geometriche dei cuscinetti.	104
Figura 6.1 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.	112
Figura 6.2 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.	112
Figura 6.3 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.	113
Figura 6.4 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.	113
Figura 6.5 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.	114

Figura 6.6 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 70 % . . . . .	114
Figura 6.7 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	115
Figura 6.8 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	115
Figura 6.9 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . . . . .	116
Figura 6.10 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . . . . .	116
Figura 6.11 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	117
Figura 6.12 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	118
Figura 6.13 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	118
Figura 6.14 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 3) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	119
Figura 6.15 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . . . . .	120
Figura 6.16 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . . . . .	120
Figura 6.17 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	121
Figura 6.18 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	122
Figura 6.19 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	123
Figura 6.20 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . . . . .	123
Figura 6.21 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	124
Figura 6.22 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . . . . .	125

Figura 6.23 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . ...	126
Figura 6.24 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . .....	126
Figura 6.25 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . ...	127
Figura 6.26 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35% . .....	130
Figura 6.27 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 35% . .....	130
Figura 6.28 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70% . .....	131
Figura 6.29 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 70% . .....	131
Figura 6.30 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35% . .....	132
Figura 6.31 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 35% . .....	132
Figura 6.32 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70% . .....	133
Figura 6.33 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . .....	133
Figura 6.34 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 % . .....	134
Figura 6.35 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 70 % . .....	135
Figura 6.36 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . .....	136
Figura 6.37 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . .....	136
Figura 6.38 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 3) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 70 % . .....	137
Figura 6.39 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . .....	138
Figura 6.40 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . .....	138
Figura 6.41 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 % . .....	139
Figura 6.42 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 % . .....	140
Figura 6.43 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 % . .....	141

Figura 6.44 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 % .....	141
Figura 6.45 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 % .....	142
Figura 6.46 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 % .....	143
Figura 6.47 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 % .....	144
Figura 6.48 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 % .....	144





## Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Sintesi delle frequenze caratteristiche.....	23
Tabella 3.1 Sensori che equipaggiano il banco prova.....	39
Tabella 3.2 Caratteristiche geometriche cuscinetto M1.....	41
Tabella 3.3 Caratteristiche geometriche cuscinetto M2.....	42
Tabella 3.4 Caratteristiche geometriche cuscinetto G1.....	42
Tabella 3.5 Caratteristiche geometriche cuscinetto G2.....	42
Tabella 3.6 Caratteristiche geometriche cuscinetto G3.....	42
Tabella 3.7 Tabella sintetica dei danneggiamenti.....	44
Tabella 3.8 Codifica danneggiamenti cuscinetto BM1.....	45
Tabella 3.9 Codifica danneggiamenti cuscinetto BM2.....	46
Tabella 3.10 Codifica danneggiamenti cuscinetto BG1.....	47
Tabella 3.11 Codifica danneggiamenti cuscinetto BG2.....	48
Tabella 3.12 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione.....	49
Tabella 3.13 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente.....	50
Tabella 4.1 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di vibrazione.....	84
Tabella 4.2 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica.....	88
Tabella 4.3 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica.....	92
Tabella 4.4 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica.....	96
Tabella 5.1 Caratteristiche geometriche dei cuscinetti.....	104
Tabella 5.2 Condizioni di funzionamento delle prove effettuate in ogni test.....	105
Tabella 5.3 Test effettuati.....	106
Tabella 5.4 Descrizione danneggiamenti cuscinetto SKF - NJ 205 ECP.....	107
Tabella 5.5 Descrizione danneggiamenti cuscinetto SKF - NJ 204 ECP.....	108
Tabella 5.6 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione.....	108
Tabella 5.7 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente.....	109
Tabella 6.1 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di vibrazione.....	128
Tabella 6.2 Risultati dell'analisi dei segnali di corrente e tensione con la tecnica EMD + SK.....	145
Tabella 6.3 Risultati del calcolo del valore RMS sui segnali di vibrazione provenienti dall'accelerometro verticale.....	147
Tabella 6.4 Risultati del calcolo del valore RMS sui segnali di corrente.....	147
Tabella 6.5 Variazioni percentuali della corrente rispetto al cuscinetto integro.....	148



# SOMMARIO

La durata è una delle caratteristiche fondamentali dei sistemi meccanici: un'adeguata progettazione è la prima modalità per garantire un'elevata affidabilità del prodotto realizzato.

La vita utile di un componente non è però determinata unicamente dalla sua progettazione ma anche da alcuni fattori che possono influire su di essa: usura, stress meccanici e termici come sovraccarichi o surriscaldamenti, oppure eventi di natura casuale, quali urti o fenomeni non prevedibili.

In questo ambito opera la manutenzione dei sistemi meccanici: il suo scopo è quello di massimizzare sia la durata che l'efficienza del sistema in modo tale che quest'ultimo abbia un elevato tasso di affidabilità.

La tendenza attuale è quella di sostituire la manutenzione a guasto (correttiva) con un approccio predittivo che richiede il monitoraggio e la diagnosi di parametri indicatori dello stato del componente.

Tra i componenti più diffusi nei sistemi meccanici rotanti i cuscinetti volventi rappresentano un componente critico per l'affidabilità dell'intero sistema del quale fanno parte.

Per questa tipologia di componenti il modo classico di procedere prevede l'analisi dei segnali di vibrazione provenienti da una adeguata sensoristica presente sul sistema.

Nella prima parte di questo lavoro di tesi sono stati analizzati i dati di vibrazione provenienti da un banco prova allestito per la diagnostica del comportamento del sistema di trazione di un treno ad alta velocità sfruttando una tecnica diagnostica che prende il nome di *Spectral Kurtosis*.

Successivamente si è posta l'attenzione sui cuscinetti montati su motori elettrici e si sono considerati sia segnali di vibrazione che segnali di corrente e di tensione per diagnosticare eventuali danneggiamenti.

Dal momento che le analisi su questo tipo di dati provenienti dal banco prova per il sistema di trazione del treno non hanno dato i risultati attesi, si è deciso di applicare lo stesso approccio ad un banco prova di laboratorio più semplice. In questo modo sono stati realizzati diversi test su cuscinetti in condizioni diverse e per condizioni di funzionamento differenti per velocità e coppia.

L'analisi dei dati raccolti ha permesso di valutare l'efficacia diagnostica di questo tipo di approccio.

**Parole chiave:** diagnostica, difetti cuscinetto, vibrazioni, corrente statorica, tensione statorica.



# ABSTRACT

One of the fundamental characteristics of mechanical systems is their operating life: correct design is the first step to ensure high reliability of the products. The useful life of a component is not determined only by its design but also by other influent factors: wear, mechanical and thermal stress, like overloading or overheating, or random nature events, like shocks or unpredictable phenomena. The maintenance of mechanical systems works in this area: its purpose is to maximize both the duration and the efficiency of the system, by allowing high reliability.

The current trend highlights the necessity to shift from failure (corrective) to predictive maintenance, which is based on the monitoring of component parameters and on the diagnosis of the state.

Rolling bearings are among the most common components in rotating mechanical systems and they are a critical component for the reliability of the system in which are installed.

For this kind of components, the classic way to proceed is to analyze the vibration signals acquired by sensors placed on the system.

In the first part of this work, vibration data collected on an industrial test-rig, built in order to simulate the behavior of the traction system of an high-speed train, have been analyzed using a recent diagnostic technique that is called Spectral Kurtosis.

Then, the attention has been focused on bearings mounted on electric motors. In addition to vibration signals, also electric signals were analyzed with the aim at investigating the possibility to use current and voltage signals measured on the motor for bearings diagnostics.

Since the analysis of current data obtained from the train traction system test-rig haven't given the expected results, the approach have been applied to a simpler laboratory test-rig.

Tests with bearings in different conditions and in correspondence of various operating conditions were performed in order to investigate the effectiveness of the analysis of stator current and voltage signals for bearings diagnostics.

**Key words:** diagnostics, bearings fault, vibrations, stator current, stator voltage.



# 1. INTRODUZIONE

La manutenzione è la scienza che organizza tutte le attività volte a mantenere o a riportare un sistema in uno stato in cui possa eseguire la funzione per cui è stato progettato e costruito [1].

Il suo obiettivo primario è quello di conservare il valore dei sistemi nel tempo.

La manutenzione inoltre ha il compito di adeguare e se possibile migliorare costantemente i sistemi per adeguarli alle esigenze espresse dai loro utilizzatori, ricorrendo dove necessario alla loro riprogettazione o alla loro sostituzione, quando i sistemi non sono più in grado di svolgere compiutamente la funzione loro assegnata.

La manutenzione in ambito aziendale è stata per molti anni vista come un costo inevitabile da sostenere, ma recentemente gli imprenditori hanno iniziato ad investire nel miglioramento di questa funzione con lo scopo di ridurre i costi ad essa connessi.

## 1.1. Costi di manutenzione

I costi totali di manutenzione sono dati essenzialmente dalla somma di due tipologie di costo, quelli propri e quelli di mancata produzione (vedi figura 1.1).

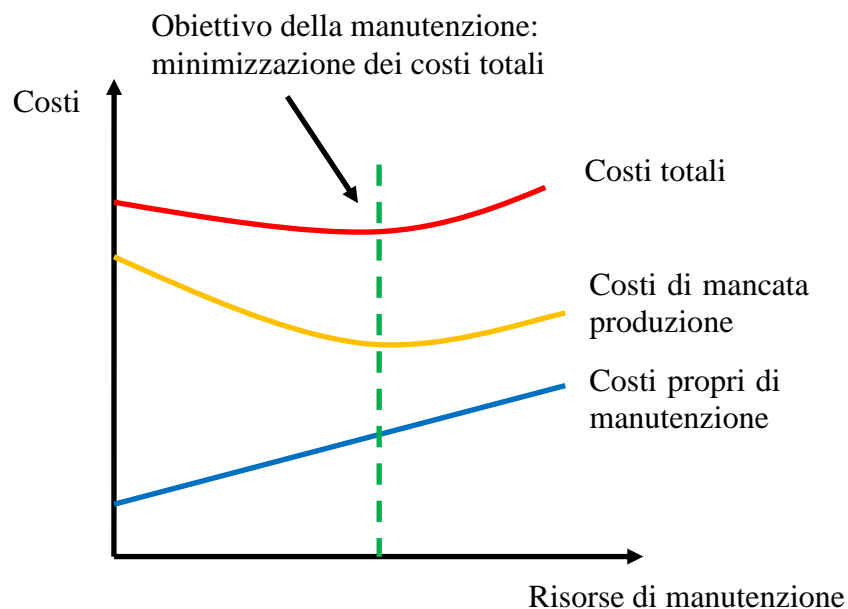


Figura 1.1 Andamento dei costi di manutenzione.

I costi propri si dividono tra diretti ed indiretti: i primi sono associati all'esecuzione degli interventi (manodopera e materiali) mentre i secondi sono riconducibili alla struttura stessa di manutenzione (servizi tecnici, materiali e servizi ausiliari).

I costi diretti di manutenzione comprendono:

- manodopera interna;
- manodopera esterna fornita da terzi;
- costi dei materiali e delle parti di ricambio.

I costi indiretti sono composti da:

- costi della struttura di manutenzione (ad esempio costo dei capi-officina, dei capi-squadra, del personale di ingegneria di manutenzione, del gestore del magazzino materiali);
- costi dei servizi tecnici ed attrezzature di funzionamento (ad esempio costi annui delle attrezzature, del materiale di esercizio generale, del materiale ausiliario e dei servizi necessari allo svolgimento dell'attività di manutenzione);
- costi di immobilizzo dei materiali di ricambio e di consumo diretto (costi di immobilizzo magazzino e dei materiali di manutenzione);
- costi dei servizi ausiliari (sistema informativo di manutenzione).

I costi di mancata produzione consistono in:

- mancata produzione a causa della ridotta disponibilità degli impianti;
- mancata qualità (scarti di prodotto a causa della riduzione della capacità del processo);
- inefficienza del servizio (aumento dei tempi di consegna di un prodotto a causa di ritardi nell'esecuzione dei piani di produzione);
- allungamento dei tempi di manutenzione in quanto gli interventi a guasto imprevisti richiedono tempi più lunghi;
- degrado degli impianti (la loro cattiva conservazione porta a rotture frequenti e a riduzione della capacità di processo);
- mantenimento a scorta dei ricambi (il livello dei magazzini è sempre alto se si adotta una politica di attesa del guasto; solo con una politica preventiva è possibile ridurre il livello medio di giacenza e ottimizzare la composizione del magazzino);
- sprechi di energia;
- mancata sicurezza (aumento del rischio di incidenti ed infortuni).

## **1.2. Politiche di manutenzione**

La manutenzione è la funzione aziendale alla quale sono demandati il controllo costante degli impianti e l'insieme dei lavori di riparazione e revisione necessari ad assicurare il funzionamento regolare e il buono stato di conservazione degli



impianti produttivi, dei servizi e delle attrezzature di stabilimento. A tal scopo è fondamentale definire un piano basato su una determinata politica di manutenzione. Le principali sono [1]:

- **manutenzione correttiva o a guasto:** il particolare meccanico rimane in opera finché l'entità del danno non è tale da imporre l'arresto del sistema. Questo tipo di manutenzione consente di contenere i costi e non richiede strutture organizzative e pianificazioni complesse. Di contro non si ha nessun preavviso di guasto (problemi di sicurezza e mancata produzione), non è possibile l'utilizzo ottimale delle squadre di manutenzione e si ha sovradimensionamento del magazzino ricambi;
- **manutenzione preventiva ciclica:** consiste in una campagna di interventi periodici da realizzarsi in base al tempo o al numero di unità prodotte dal sistema ed indipendentemente dallo stato del componente meccanico. Il vantaggio risiede nell'ottimizzazione della politica manutentiva; di contro i costi sono piuttosto elevati in quanto il componente non viene utilizzato per tutta la sua vita utile;
- **manutenzione preventiva secondo condizione o CBM (*Condition Based Maintenance*):** il sistema viene monitorato e vengono calcolati degli indicatori dello stato di salute dello stesso; se questi indicatori superano valori di soglia predefiniti, il sistema viene arrestato e viene eseguita la sostituzione del componente danneggiato. Questa politica comporta benefici sui costi diretti perché si possono pianificare gli interventi e si riduce la giacenza in magazzino acquistando solo i ricambi necessari per l'intervento;
- **manutenzione preventiva predittiva:** il sistema viene monitorato e vengono acquisiti i dati che consentono di prevedere il momento del guasto e di decidere opportune azioni di riparazione o di sostituzione;
- **manutenzione migliorativa:** si realizzano modifiche sui componenti danneggiati in modo da eliminare la causa del guasto. I punti di forza sono bassi costi e possibilità di eliminare definitivamente problemi ricorrenti; i punti di debolezza sono invece dovuti al fatto che le cause di alcuni guasti possono essere di difficile individuazione e se l'azione migliorativa è importante si incorre in alti costi e lunghi periodi di fermo macchina;
- **manutenzione produttiva:** in questo tipo di manutenzione il compito del monitoraggio è affidato ad un operatore specializzato dedicato alla macchina che deve essere in grado di valutare l'eventuale necessità di un intervento.

### 1.3. Manutenzione dei cuscinetti

I cuscinetti a rotolamento sono particolari meccanici la cui funzione è quella di interporsi fra organi di macchina in rotazione reciproca e di limitarne l'attrito, trasformandolo da radente (cuscinetti a strisciamento) in volvente, riducendo così l'energia dissipata.

Gli elementi volventi possono avere diversa geometria: sfere, aghi, rulli cilindrici, rulli conici o a botte.

La scelta del tipo di elemento volvente dipende dall'applicazione del cuscinetto, dal carico cui è sottoposto e dalla sua direzione: se sono sottoposti a carichi assiali, gli elementi volventi più adatti sono le sfere o i rulli conici, se invece il carico è puramente radiale solitamente vengono utilizzati rulli cilindrici. Vengono utilizzati cuscinetti orientabili con rulli a botte se vi è la possibilità di un disassamento dell'albero, mentre i cuscinetti ad aghi sono impiegati quando lo spazio a disposizione tra gli elementi in moto reciproco è ridotto.

L'impiego dei cuscinetti volventi è diffuso in molti ambiti della meccanica: dai rotor di motori elettrici (vedi figura 1.5) ai mandrini delle macchine per asportazione di truciolo, dagli alberi a gomiti dei motori endotermici (vedi figura 1.3) alle trasmissioni meccaniche (vedi figura 1.4), dai rotor delle pale eoliche a quelli delle pompe centrifughe (vedi figura 1.2) e dei compressori centripeti.

E' facile comprendere che un guasto ad un cuscinetto può compromettere il funzionamento del sistema in cui è inserito. Per questo la loro manutenzione è un aspetto molto importante per migliorare la longevità dei sistemi meccanici.

Un cuscinetto sporco o danneggiato aumenta la resistenza al rotolamento delle parti meccaniche oltre ad aggiungere vibrazioni nel moto. Questo provoca un deterioramento molto rapido degli organi interessati.

Le uniche operazioni possibili sono quelle di ingrassaggio e lubrificazione e vengono di solito programmate in base al numero di cicli effettuati dal cuscinetto.

Queste precauzioni comunque non mettono al riparo da eventuali formazioni di difetti e conseguente deterioramento del funzionamento del cuscinetto; si è quindi indirizzati a considerare che le tipologie di manutenzione più adatte siano quella preventiva secondo condizione oppure quella preventiva predittiva, in quanto entrambe permettono di monitorare il sistema ed ottenere informazioni sull'evoluzione del suo stato.

La diagnostica è quindi fondamentale per evitare la nascita di guasti che porterebbero alla sospensione non programmata dell'attività della macchina, con tutte le conseguenze dovute alla mancata produzione.

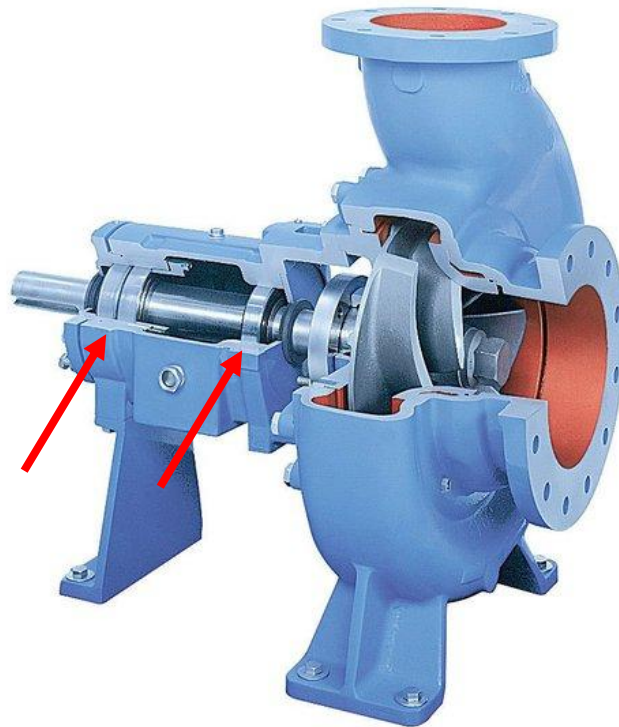


Figura 1.2 Vista di una pompa centrifuga.

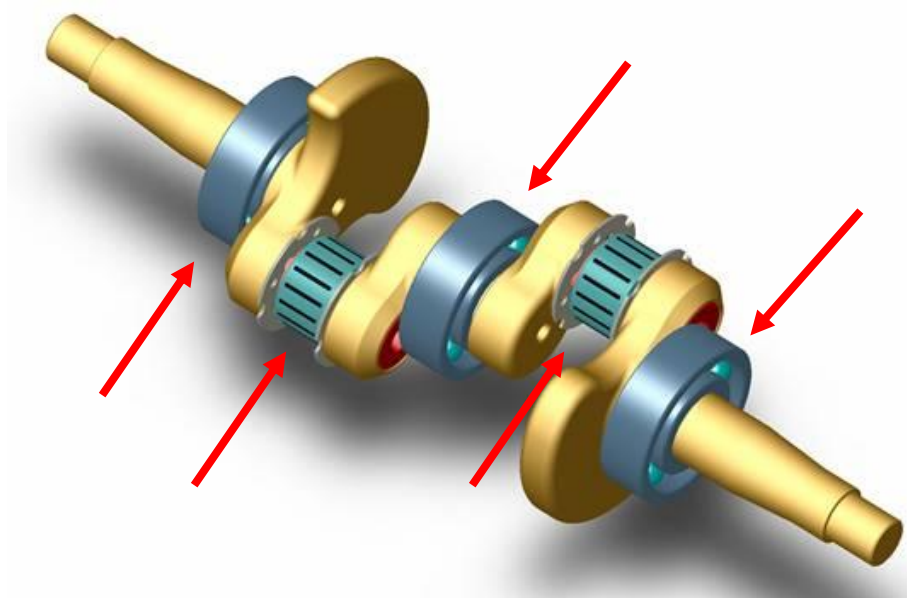


Figura 1.3 Vista di un albero a gomiti di motore endotermico.

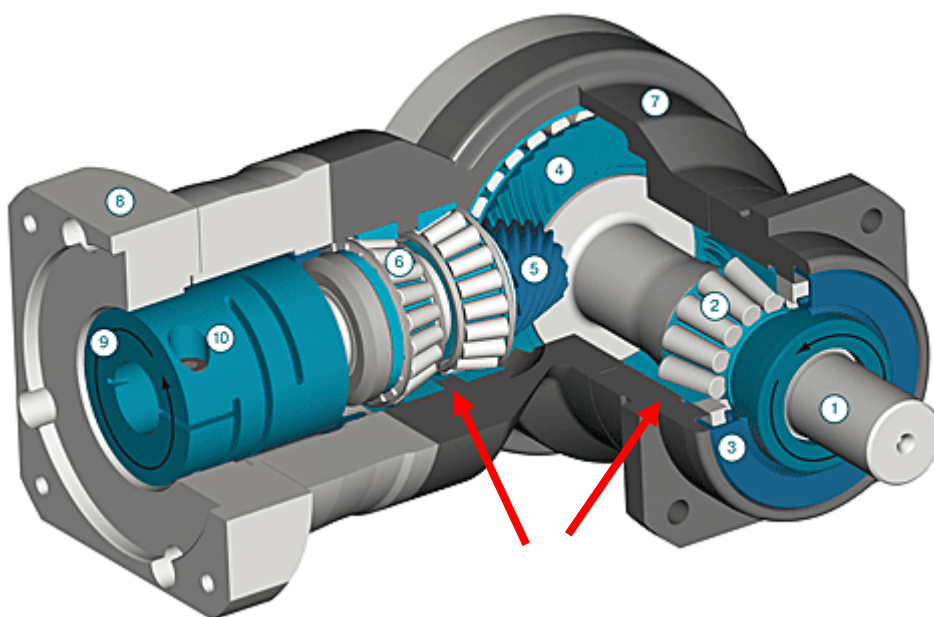


Figura 1.4 Vista di una trasmissione a ruote coniche a denti elicoidali.

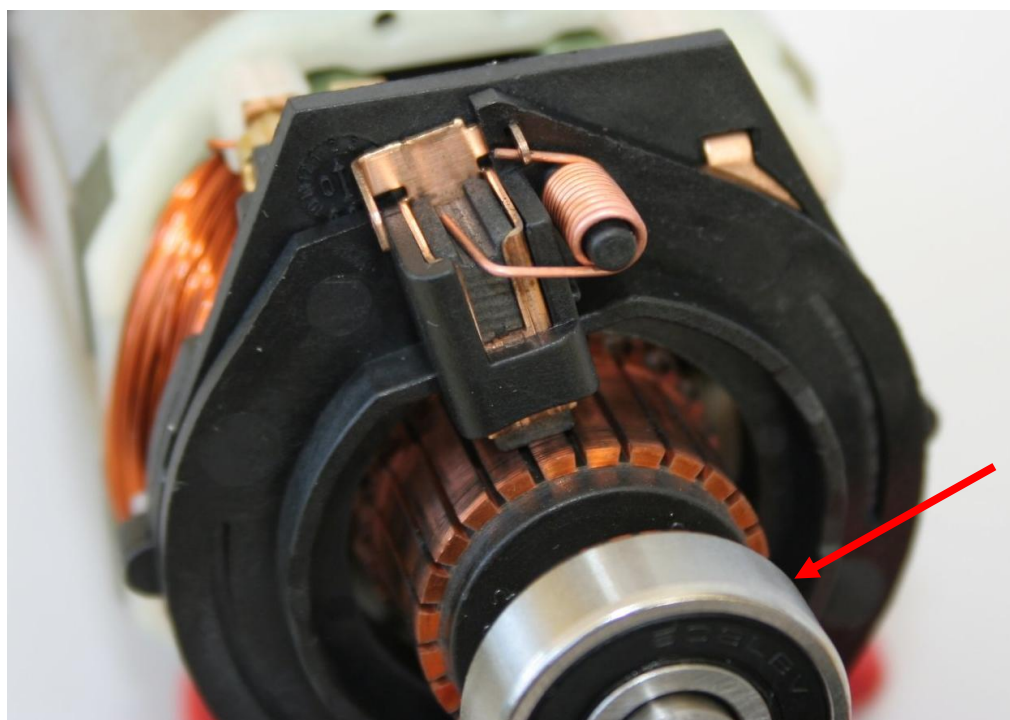


Figura 1.5 Vista di un rotore di un motore elettrico.

## 1.4. Obiettivo e sviluppo della tesi

Quanto è stato esposto finora aiuta a comprendere quanto sia importante la manutenzione in ambito industriale, in particolare se applicata ai cuscinetti volventi. Nell'ottica di migliorare questa funzione e possibilmente di ridurre i costi inerenti ad essa, la ricerca di tecniche che possano diagnosticare eventuali difetti riducendo i tempi di fermo macchina è continua.

Il presente lavoro di tesi intende focalizzare l'attenzione su di una tecnica per l'analisi dei segnali di vibrazione che possa essere d'aiuto nella diagnostica dei danneggiamenti dei cuscinetti volventi e, in seguito, indagare se sia possibile eseguire la stessa diagnosi non più utilizzando i segnali di vibrazione ma quelli di corrente e di tensione tipici del funzionamento dei motori elettrici.

E' intuitivo capire che ciò comporterebbe un notevole risparmio in complessità del sistema e quindi, in ultima analisi, di costo.

La prima parte di questo lavoro passa in rassegna i difetti tipici che si possono creare sui cuscinetti volventi, le frequenze proprie che questi ultimi danno luogo negli spettri dei segnali e le tecniche di analisi dei segnali, siano essi di vibrazione oppure di tensione e di corrente.

Successivamente (capitoli 3 e 4) viene descritto un banco prova già realizzato per lo studio del comportamento del sistema di trazione di un treno ad alta velocità e vengono analizzati i dati provenienti da quest'ultimo seguendo i due diversi approcci.

I risultati ottenuti dall'analisi di tensione e corrente non sono stati incoraggianti così è stato realizzato in laboratorio un banco prova più semplice per verificare se la tecnica di diagnosi attraverso i dati elettrici dei motori possa essere valida per la diagnostica sui cuscinetti.

Nei capitoli 5 e 6 vengono descritti il banco prova realizzato, i cuscinetti ed i danneggiamenti studiati, le prove che sono state compiute ed infine i risultati che sono stati ottenuti.

Il capitolo 7 riporta alcune considerazioni sul lavoro che è stato svolto mettendo in luce quali possano essere alcuni sviluppi futuri in merito alla diagnostica *sensorless*, cioè attraverso le grandezze tipiche del funzionamento dei motori elettrici senza l'applicazione di sensori, tipicamente accelerometri.



## 2. DIAGNOSTICA SU CUSCINETTI VOLVENTI: STATO DELL'ARTE

Le cause dei difetti dei cuscinetti volventi possono essere di diversa natura: usura (ad esempio dovuta ad una lubrificazione errata o assente), fatica, carico eccessivo, presenza di detriti, urti o altri fenomeni non prevedibili [18].

Le principali cause di danneggiamento sono dovute al fenomeno meccanico della fatica e all'errata o non adeguata lubrificazione. Nel primo caso il cuscinetto sottoposto a carichi variabili nel tempo si danneggia nonostante l'entità dei carichi applicati sia sensibilmente inferiore al carico di rottura o di snervamento del materiale stesso, mentre nel secondo caso la mancanza di lubrificazione determina una sovratemperatura locale tale da alterare le proprietà del materiale e generare rotture con conseguente asportazione del materiale. Queste microparticelle metalliche asportate inquinano il lubrificante e determinano un'azione abrasiva sulle superfici di scorrimento (anelli interno ed esterno) [18].

Prove sperimentali vengono eseguite per studiare il comportamento di un cuscinetto danneggiato e il suo effetto sul sistema in cui è posto.

Per eseguire queste prove è possibile operare in due modi: il primo è quello di creare artificialmente il difetto in maniera meccanica o chimica e studiare la sua propagazione, il secondo è quello di portare il cuscinetto ad avere un difetto naturale ottenuto con l'applicazione di un carico e la rotazione del cuscinetto, anche ad elevata velocità.

Le vibrazioni generate dalla rotazione dei cuscinetti in buono stato sono di tipo *random* ciclostazionarie [2] [3] [5]. Nel caso del funzionamento dei cuscinetti danneggiati ad esse si aggiungono anche frequenze caratteristiche tipiche dei difetti [2] [7].

Queste frequenze possono essere stimate a partire dalle caratteristiche geometriche dei cuscinetti stessi e sono funzioni delle condizioni di funzionamento.

Le frequenze tipiche dei difetti non sono però perfettamente correlate alla frequenza di rotazione dell'albero a causa del fenomeno dello *slippage*, cioè si verifica uno slittamento fra gli elementi volventi e le piste interna ed esterna [4]. Infatti l'angolo di contatto (identifica l'inclinazione, rispetto alla direzione verticale, della retta su cui avviene il contatto fra le sfere e le piste ricavate sugli anelli) varia in base alla posizione dell'elemento volvente nel cuscinetto, poiché varia il rapporto tra il carico radiale e quello assiale, portando gli elementi volventi a ruotare a velocità differenti tra loro. La presenza della gabbia obbliga

gli elementi volventi ad assumere una velocità media costante, provocando uno slittamento casuale pari a circa l'1-2% della frequenza di rotazione della gabbia. Per questo motivo, quando vengono applicate tecniche di analisi dei segnali che puntano a ridurre il rumore, i picchi legati alla presenza del difetto, non essendo puramente deterministici, non si sommano tra loro e non vengono quindi amplificati [2].

La diagnostica sui cuscinetti volventi si basa quindi sulla conoscenza delle frequenze caratteristiche dei cuscinetti danneggiati e sulla loro presenza negli spettri in frequenza ottenuti applicando diverse tecniche di analisi dei segnali acquisiti sul sistema (vedi paragrafo 2.3).

Usualmente sono utilizzati segnali di vibrazione ottenuti grazie ad accelerometri posti in corrispondenza dei cuscinetti.

Tale approccio è l'unico attuabile nel caso di diagnostica su organi meccanici quali trasmissioni, riduttori, ecc., ma comporta un elevato costo della strumentazione, un aumento della complessità del sistema e una introduzione di eventuali problemi connessi ai sensori stessi, oltre ad una capacità del sistema di acquisizione non indifferente e alla grande mole di dati da analizzare.

Nel caso di cuscinetti applicati a motori elettrici, si è cercato di ovviare a questi problemi introducendo un nuovo approccio diagnostico eseguito sfruttando quelle grandezze che sono tipiche del loro funzionamento, ovvero l'analisi dei segnali di tensione e corrente che li controllano.

## **2.1. Frequenze caratteristiche del malfunzionamento dei cuscinetti in segnali di vibrazione**

Esistono due grandi classi di difetti che possono presentarsi in un cuscinetto [1]:

- **difetti localizzati:** ad esempio una cricca, un'impronta o un'incisione;
- **difetti distribuiti:** ad esempio disallineamenti, eccentricità degli anelli o degli elementi volventi, ecc.

I difetti localizzati sui cuscinetti possono essere di quattro tipi, ognuno dei quali genera una vibrazione ad una determinata frequenza caratteristica nello spettro. Questa dipende principalmente da due parametri quali la velocità di rotazione relativa degli anelli e il numero degli elementi volventi [2] [15] [18].

### **2.1.1. Difetto sulla pista interna**

Quando avviene il passaggio di un elemento volvente sul difetto situato sulla pista interna di un cuscinetto (vedi figura 2.1) si ha un urto che provoca una vibrazione ad una frequenza caratteristica (BPFI, *Ball Pass Frequency Inner race*), che è possibile stimare con la (2.1) [2]:



$$BPFI = \frac{Z}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos\beta \right) \quad (2.1)$$

dove:

- $Z$  indica il numero di corpi volventi del cuscinetto;
- $f_r$  è la frequenza di rotazione dell'albero [Hz];
- $d$  è il diametro del singolo elemento volvente [mm];
- $D$  è il diametro medio del cuscinetto, anche detto diametro di *pitch* [mm];
- $\beta$  è l'angolo di contatto [rad].

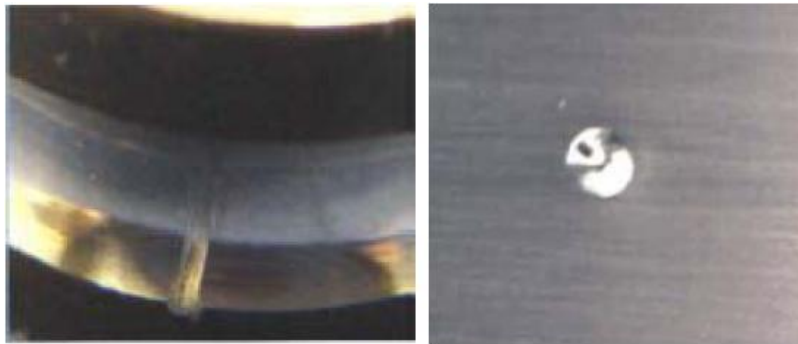


Figura 2.1 Tipici danneggiamenti sulla pista interna.

### 2.1.2. Difetto sulla pista esterna

La frequenza caratteristica (BPFO, *Ball Pass Frequency Outer race*) con cui si registra il passaggio dei corpi volventi sul difetto della pista esterna (vedi figura 2.2) è data dalla (2.2) [2]:

$$BPFO = \frac{Z}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\beta \right) \quad (2.2)$$

nella quale i parametri sono analoghi a quelli sopra indicati.

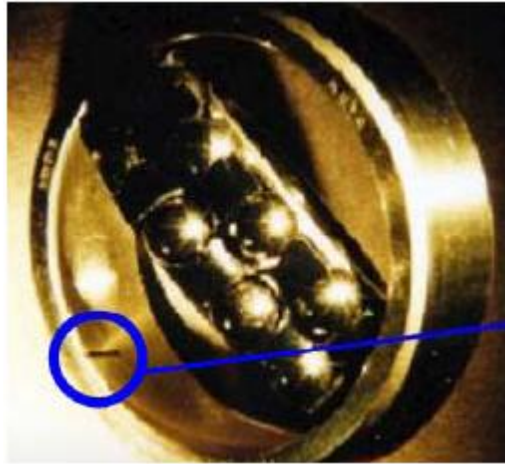


Figura 2.2 Tipico danneggiamento sulla pista esterna.

### 2.1.3. Difetto sull'elemento volvente

Durante la rotazione del cuscinetto, il corpo volvente compie un moto di rivoluzione attorno all'asse dell'albero e un moto di rotazione attorno al proprio asse. Nell'ambito di tale rotazione il difetto sul corpo (vedi figura 2.3) incontra una volta l'anello esterno e una volta l'anello interno; a questo fenomeno può essere ricondotta una frequenza caratteristica (*BSF*, *Ball Spin Frequency*) [2]. Tale frequenza è stimabile con la (2.3):

$$BSF = \frac{D}{d} f_r \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\beta \right)^2 \right) \quad (2.3)$$

nella quale i parametri sono analoghi a quelli sopra indicati.



Figura 2.3 Tipico danneggiamento sull'elemento volvente.

#### 2.1.4. Difetto sulla gabbia

Il difetto sulla gabbia (vedi figura 2.4) può essere dovuto ad una sua eccentricità, ad una sua rottura (caso raro) o alla presenza di giochi eccessivi fra gabbia ed elementi volventi (caso più comune) [2] [6].

La frequenza caratteristica (FTF, *Fundamental Train Frequency*) è stimabile con la (2.4):

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\beta \right) \quad (2.4)$$

nella quale i parametri sono analoghi a quelli sopra indicati.



Figura 2.4 Tipico danneggiamento sulla gabbia di un cuscinetto volvente.

## 2.2. Frequenze caratteristiche del malfunzionamento dei cuscinetti in segnali di corrente

A livello industriale, nei sistemi meccanici, è molto diffuso l'uso dei motori elettrici, siano essi alimentati in corrente continua o in alternata.

In questi sistemi è possibile sfruttare il segnale della corrente statorica, per far diagnostica non solo sullo stato del motore ma anche sulle condizioni dei cuscinetti applicati al rotore.

Esistono due possibili modalità di definizione delle frequenze caratteristiche dei difetti riscontrabili negli spettri dei segnali di corrente: la prima si basa sulla variazione della distanza fra statore e rotore (*gap*) dovuta alla presenza del difetto sul cuscinetto, la seconda si basa sulla variazione della coppia erogata dal motore causata sempre dalla presenza del difetto [12] [20].

### 2.2.1. Definizione basata sulla variazione del gap

Questo approccio si basa su un effetto che si viene a creare quando il cuscinetto è danneggiato: la variazione del gioco radiale del rotore  $g(\theta, t)$ , cioè un cambiamento della distanza (*gap*) fra rotore e statore (vedi figure 2.5 e 2.6) [12] [20] [21] [22] [23].

La modificazione del *gap* produce una variazione della densità del flusso elettromagnetico  $B_{tot}(\theta, t)$  che a sua volta è correlabile alla corrente statorica  $I_m(t)$ .

Il *gap* può essere calcolato con la (2.5):

$$g(\theta, t) = g_0 \left[ 1 - e \cos(\theta + \psi(t)) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{k}{f_c}\right) \right] \quad (2.5)$$

dove:

- $g_0$  rappresenta il *gap* nel caso di cuscinetto integro [mm];
- $e$  indica il grado di eccentricità introdotto dal difetto;
- $\theta$  indica la posizione angolare [rad];
- $\psi(t)$  assume valori differenti in base al difetto presente sul cuscinetto [rad]:

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & \text{difetto BPFO} \\ \omega_r t & \text{difetto BPF1} \\ \omega_g t & \text{difetto BSF} \end{cases} \quad (2.6)$$

- $\delta$  indica la funzione Delta di Dirac;
- $f_c$  indica la frequenza caratteristica del difetto (BPFO, BPF1, BSF) [Hz].

La variazione del *gap* provoca la variazione della permeanza magnetica  $\Lambda(\theta, t)$  [H] [12]:

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu}{g(\theta, t)} \quad (2.7)$$

dove  $\mu = \mu_r \mu_0$  indica la permeabilità magnetica del *gap*.  
Si calcola la forza magnetomotrice  $MMF(\theta, t)$  [As] [12]:

$$MMF(\theta, t) = F \cos(p \theta - \omega_s t + \varphi) \quad (2.8)$$

dove:

- $p$  indica il numero di paia poli;
- $\omega_s$  indica la pulsazione della corrente di alimentazione [rad/s];

- $\varphi$  indica la fase [rad].

Moltiplicando la permeanza magnetica  $\Lambda(\theta, t)$  per la forza magnetomotrice  $MMF(\theta, t)$  si ottiene la densità di flusso del gap  $B_{tot}(\theta, t)$  [T][12]:

$$B_{tot}(\theta, t) = MMF(\theta, t) \Lambda(\theta, t) \quad (2.9)$$

Questa componente aggiuntiva di densità di flusso provoca un flusso magnetico addizionale  $\Phi(\theta, t)$  che può essere calcolato tenendo conto della geometria della macchina.

Se viene imposta la differenza di potenziale sullo statore, la componente aggiuntiva del flusso magnetico provoca una variazione della corrente sullo statore in accordo con la (2.10):

$$V_m(t) = R_s I_m(t) + \frac{d\Phi_m(t)}{dt} \quad (2.10)$$

La corrente di statore [A] in ogni fase è data dalla derivata del flusso corrispondente.

Questo porta alla definizione seguente:

$$I_m(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} I_k \cos[\pm\psi(t) \pm k\omega_g t - \omega_s t + \varphi_m] \quad (2.11)$$

dove  $\omega_s$  [rad/s] viene assunta costante.

A questo punto è chiaro che il movimento radiale del rotore dovuto al cuscinetto danneggiato provoca l'insorgenza di componenti in frequenza addizionali nella corrente di statore.

Le componenti aggiuntive dipendono dal tipo di difetto:

- difetto sulla pista esterna [Hz]:  $f = |f_s \pm k BPF0|$
- difetto sulla pista interna [Hz]:  $f = |f_s \pm f_r \pm k BPF1|$
- difetto sull'elemento volvente [Hz]:  $f = |f_s \pm f_g \pm k BSF|$

dove:

- $k = 1, 2, 3, \dots$ ;
- $f_r$  indica la frequenza di rotazione [Hz];
- $f_s$  indica la frequenza di alimentazione [Hz].

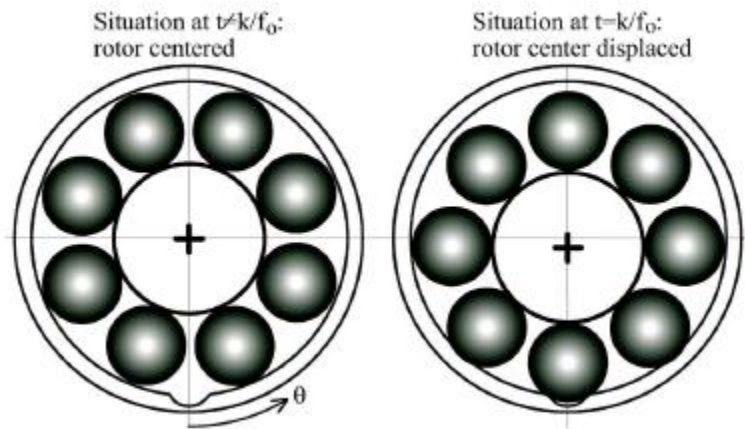


Figura 2.5 Movimento radiale del rotore dovuto ad un difetto sulla pista esterna [21].

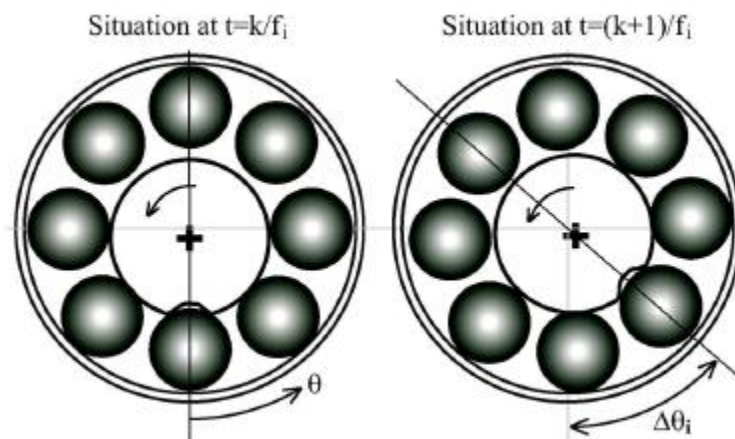


Figura 2.6 Movimento radiale del rotore dovuto ad un difetto sulla pista interna [21].

### 2.2.2. Definizione basata sulla variazione della coppia

Il fenomeno sul quale si basa questo approccio è quello per cui si ha una variazione di coppia in seguito alla manifestazione del difetto.

Si pensi, per esempio, ad una sfera che viene a contatto con un difetto sulla pista esterna: nel momento in cui il corpo volvente cerca di superare il difetto si ha un conseguente aumento di coppia erogata dal motore.

La coppia erogata dal motore può essere espressa come somma di una componente costante  $\Gamma_0$  e di una componente variabile  $\Gamma_c$  legate ad una frequenza caratteristica  $f_c$  [12] [20] [21] [22] [23]:

$$\Gamma_{load}(t) = \Gamma_0 + \Gamma_c \cos(\omega_c t) \quad (2.12)$$

dove  $\omega_c = 2\pi f_c$  [rad/s].

Il legame fra la variazione della coppia e la variazione della velocità del motore è data dalle (2.13) e (2.14) [12]:

$$\sum \Gamma(t) = \Gamma_{motor}(t) - \Gamma_{load}(t) = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.13)$$

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int_t (\Gamma_{motor}(\tau) - \Gamma_{load}(\tau)) d\tau \quad (2.14)$$

dove:

- $\Gamma_{motor}$  indica la coppia elettromagnetica prodotta dal motore [Nm];
- $J$  indica l'inerzia totale del carico [ $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ].

Nel caso quasi-statico la coppia del motore è uguale alla parte costante della coppia del carico:

$$\Gamma_{motor}(t) = \Gamma_0 \quad (2.15)$$

Si arriva così a definire la velocità di rotazione mediante la (2.16) [12]:

$$\omega_r(t) = -\frac{1}{J} \int_{t_0}^t \Gamma_c \cos(\omega_c \tau) d\tau + C = -\frac{\Gamma_c}{J\omega_c} \sin(\omega_c t) + \omega_{r0} \quad (2.16)$$

dove  $\omega_{r0}$  indica la componente costante della velocità [rad/s].

La posizione angolare del rotore è data dalla (2.17) [12]:

$$\theta_r(t) = \int_{t_0}^t \omega_r(\tau) d\tau = \frac{\Gamma_c}{J\omega_c^2} \cos(\omega_c t) + \omega_{r0} t \quad (2.17)$$

In questo caso la variazione delle frequenze caratteristiche è legata alla posizione del rotore, mentre per cuscinetti integri vale  $\theta_r(t) = \omega_{r0} t$ .

Questo perché la variazione di posizione del rotore ha influenza sulla forza magnetomotrice  $MMF_r(\theta, t)$ . Si ottiene così [12]:

$$MMF_r(\theta, t) = MMF_r \cos(p\vartheta - \omega_s t - pA_c \cos(\omega_c t)) \quad (2.18)$$

dove:

- $p$  indica il numero di paia poli;
- $\omega_s$  indica la pulsazione della corrente di alimentazione [rad/s];
- $A_c$  indica l'ampiezza della variazione angolare ed è definita dalla (2.19):

$$A_c = \frac{\Gamma_c}{J\omega_c^2} \quad (2.19)$$

Si deduce quindi che la variazione di coppia alla frequenza  $f_c$  porta ad una modulazione di fase della forza magnetomotrice del rotore.

La densità di flusso del *gap*  $B_{tot}(\theta, t)$  [T] si ottiene moltiplicando la permeanza magnetica  $\Lambda(\theta, t)$  per la forza magnetomotrice  $MMF(\theta, t)$  [As] [12]:

$$B_{tot}(\theta, t) = MMF(\theta, t) \Lambda(\theta, t) \quad (2.20)$$

Derivando il flusso si ottiene la corrente statorica [A] nella fase  $m$  [12]:

$$I_m(t) = I_1 \sin(\omega_s t + pA_c \cos(\omega_c t)) + I_2 \sin(\omega_s t + pA_c \cos(\omega_c t) + \omega_c t) - I_2 \sin(\omega_s t + pA_c \cos(\omega_c t) - \omega_c t) \quad (2.21)$$

dove il termine contenente  $I_1$  è più grande dei termini contenenti  $I_2$ .

La frequenza degli eventuali difetti nello spettro del segnale di corrente è data dalla (2.22):

$$f(t) = f_s - pA_c f_c \sin(\omega_c t) \pm k f_c \quad (2.22)$$

dove  $k$  può assumere il valore 0 oppure 1.

In conclusione si ottiene [12]:

- difetto sulla pista esterna [Hz]:  $f = |f_s \pm k BPF0|$
- difetto sulla pista interna [Hz]:  $f = |f_s \pm k BPF1|$
- difetto sull'elemento volvente [Hz]:  $f = |f_s \pm k BSF|$

dove:

- $k = 1, 2, 3, \dots$ ;
- $f_s$  indica la frequenza di alimentazione [Hz].



In tabella 2.1 è riportata una sintesi delle frequenze caratteristiche.

**Tabella 2.1 Sintesi delle frequenze caratteristiche.**

	Tecnica basata sulla variazione del gap	Tecnica basata sulla variazione della coppia
Difetto sulla pista esterna [Hz]	$f =  f_s \pm k BPF0 $	$f =  f_s \pm k BPF0 $
Difetto sulla pista interna [Hz]	$f =  f_s \pm f_r \pm k BPF1 $	$f =  f_s \pm k BPF1 $
Difetto sull'elemento volvente [Hz]	$f =  f_s \pm f_g \pm k BSF $	$f =  f_s \pm k BSF $

### 2.3. Tecniche di analisi dei segnali

L'ambito delle tecniche di processamento dei segnali per il monitoraggio e la diagnostica di componenti meccanici è piuttosto approfondito e fiorente, per cui sono reperibili in letteratura scientifica svariate tecniche efficaci per la diagnostica dei cuscinetti.

Ognuna di esse ha caratteristiche peculiari ed è più o meno adatta allo scopo in base al tipo di segnale da analizzare.

Nell'ambito dei cuscinetti i segnali campionati sono sempre di tipo *waveform* (dati raccolti in uno specifico intervallo temporale per una specifica variabile); è dunque possibile svolgere quattro tipi di analisi:

1. analisi nel dominio delle ampiezze o delle *magnitudo*;
2. analisi nel dominio del tempo;
3. analisi nel dominio delle frequenze;
4. analisi nel dominio misto tempo-frequenza.

#### 2.3.1. Analisi nel dominio della magnitudo

In questo tipo di analisi si prendono in considerazione le grandezze statistiche d'aiuto nella caratterizzazione di un segnale. Esse sono legate sia alle componenti impulsive presenti nel segnale di vibrazione sia all'energia trasportata dal segnale stesso [3].

Il momento statistico non centrato di ordine  $n$  di una grandezza  $x$  è definibile come il valore medio della potenza  $n$ -esima di  $x$ :

$$E[x(t)^n] = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t))^n dt \quad (2.23)$$

Il momento del primo ordine ( $n=1$ ) rappresenta il valore medio del segnale; se si sottrae tale valor medio alla grandezza  $x$  si ottiene un momento centrato.

Il momento del secondo ordine ( $n=2$ ) centrato è lo scarto quadratico medio o varianza ed è definito dalla (2.24):

$$\sigma_x^2 = \overline{x'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.24)$$

Il momento del terzo ordine ( $n=3$ ) centrato è:

$$\overline{x'^3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.25)$$

Tale momento permette di definire un parametro, lo *Skewness* che indica l'asimmetria della distribuzione statistica ed è definito dalla (2.26):

$$S = \frac{\overline{x'^3}}{\sigma^3} \quad (2.26)$$

Il momento del quarto ordine ( $n=4$ ) centrato è:

$$\overline{x'^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 \quad (2.27)$$

La *Kurtosis* descrive la forma della curva della densità di probabilità della distribuzione statistica ed è ricavabile con la (2.28):

$$K = \frac{\overline{x'^4}}{\sigma^4} \quad (2.28)$$

All'aumentare della componente impulsiva in un segnale periodico si presume che aumenti anche il valore di tale grandezza.

Interessante indicatore è il valore quadratico medio o *Root Mean Square* (RMS), che può essere inteso come il valore continuo che rende conto del contenuto energetico dell'intero segnale.

E' definito dalla (2.29):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.29)$$

Il *Crest Factor* è definito come il rapporto fra il valore di picco di un segnale e il suo valore RMS:

$$CF = \frac{V_{picco}}{V_{RMS}} \quad (2.30)$$

Questo indicatore è fortemente influenzato dalla presenza di picchi nel segnale ma non tiene conto della loro numerosità: basta anche solo un valore anomalo per osservare una notevole variazione del CF di un segnale.

Secondo molti studi un eventuale danneggiamento si traduce in un aumento dei valori assunti da questi indicatori statistici, in particolare la *Kurtosis* e il valore RMS.

In realtà, nelle applicazioni reali, questo è confermato solo in alcuni e sporadici casi. Inoltre indici di questo tipo contano di individuare il processo di formazione del difetto, ma non permettono di affermare nulla sulla sua natura.

Ulteriore elemento negativo è che tutti questi indicatori, utilizzati in ambito diagnostico, presentano una scarsa robustezza: è sufficiente infatti un livello più elevato di rumore per far variare i valori di queste grandezze, senza però che questa variazione sia legata all'eventuale presenza di un difetto.

### 2.3.2. Analisi nel dominio del tempo

Un segnale nel dominio del tempo è la registrazione di un'onda derivante dalla fluttuazione di una grandezza. Nell'analisi di questo tipo di segnali è possibile definire una funzione: la correlazione.

Essa rende conto della somiglianza fra due entità: se si applica la correlazione su di uno stesso segnale  $x(t)$  si parla di autocorrelazione  $R_{xx}(\tau)$ , se invece i segnali sono diversi ( $x(t)$ ,  $y(t)$ ), ma riguardanti lo stesso fenomeno, si parla di crosscorrelazione  $R_{xy}(\tau)$ :

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (2.31)$$

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (2.32)$$

dove  $\tau$  rappresenta lo sfasamento tra i due segnali.

Sfruttando questa funzione è possibile calcolare, nel caso dell'autocorrelazione, il periodo del segnale andando a misurare lo sfasamento  $\tau$  tra due picchi successivi; se invece viene impiegata la crosscorrelazione si può individuare lo sfasamento temporale fra i due segnali impiegati.

### **2.3.3. Analisi nel dominio delle frequenze**

In molte applicazioni odierne la caratterizzazione del segnale nel dominio del tempo o della *magnitudo* è spesso poco efficace; diventa quindi fondamentale spostare l'analisi da questi domini a quello delle frequenze.

La trasformata di Fourier consente di determinare le componenti in frequenza presenti nel segnale e di individuare l'energia associata ad ognuna di esse.

L'ipotesi su cui si basa il passaggio dal dominio del tempo a quello delle frequenze è che il segnale, e quindi il fenomeno che descrive, sia periodico.

I segnali periodici hanno la caratteristica fondamentale di poter essere descritti come somma di segnali armonici.

I fenomeni reali, in generale, non danno luogo a segnali perfettamente periodici: se si assume però che il loro periodo tenda alla lunghezza del segnale campionato allora è possibile ritenerli tali.

### **2.3.4. Analisi nel dominio misto tempo-frequenza**

Il grosso difetto dell'analisi in frequenza è il fatto che, se da un lato essa fornisce informazioni esaustive riguardo quante e quali frequenze esistano in un segnale, dall'altro non permette di capire quando queste frequenze sono esistite.

Per questo motivo sono state create tecniche di analisi nel dominio misto tempo-frequenza che, se da un lato sono piuttosto complesse, dall'altro consentono di ottenere informazioni contestualmente in entrambi i domini.

#### **2.3.4.1. Short Time Fourier Transform e Trasformata Wavelet**

La *Short Time Fourier Transform* è una tecnica di analisi dei segnali che si basa sulla trasformata di Fourier.

Quest'ultima estrae lo spettro in frequenza sull'intero segnale campionato, mentre la STFT estrae lo spettro in frequenza sulle  $n$  sottofinestre in cui viene suddiviso l'intero segnale.

L'algoritmo utilizzato è quindi lo stesso della DFT, ma in questo caso viene applicato a tutte le  $n$  sottofinestre:

$$STFT [f(t); \omega, t] = \langle f(t), w(t - \tau) e^{j\omega t} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) w(t - \tau) e^{j\omega t} dt \quad (2.33)$$

dove la funzione *kernel*  $w(t - \tau) e^{j\omega t}$  è costituita da un fattore dipendente dalla frequenza ( $e^{j\omega t}$ , estrae lo spettro in frequenza) e da un fattore dipendente dal tempo ( $w(t - \tau)$ , rappresenta lo *shift* temporale).

Il risultato di questa analisi è un grafico tridimensionale, che prende il nome di spettrogramma, dove le tre dimensioni sono tempo, frequenza e ampiezza (in genere rappresentata con una scala cromatica), che fornisce la distribuzione energetica del segnale sul piano  $(\tau, f)$  (vedi figura 2.7).

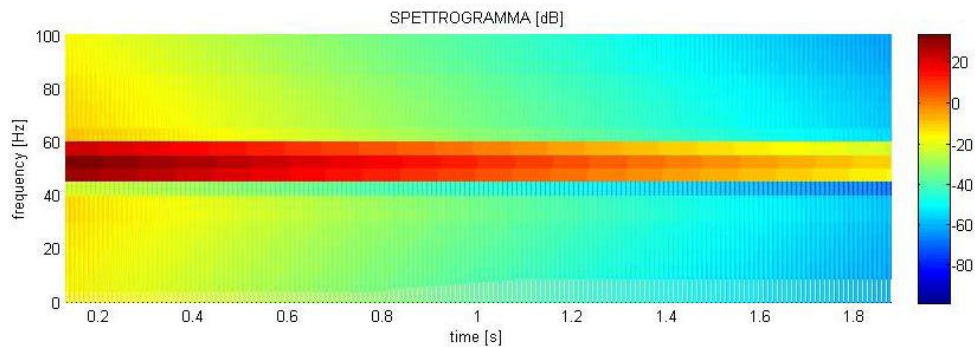


Figura 2.7 Spettrogramma.

Il grande vantaggio di questa tecnica consiste nella possibilità di localizzare un fenomeno circoscritto ad un limitato intervallo di tempo e di fornirne contemporaneamente il contenuto armonico.

Inoltre consente di rintracciare le variazioni di frequenza nel tempo per segnali formati da componenti armoniche i cui moduli e le cui frequenze risultano variabili nel dominio temporale.

Il limite principale di questa tecnica è legato al principio di indeterminazione di Heisenberg: non è possibile avere una buona localizzazione temporale e buona risoluzione in frequenza poiché  $\Delta t \cdot \Delta f = costante$ .

Inoltre, si osserva che l'informazione contenuta nello spettrogramma è maggiormente concentrata alle alte frequenze, rispetto alle basse, in corrispondenza delle quali è molto difficile riconoscere in modo efficace componenti armoniche differenti.

Come è stato illustrato in precedenza, il limite principale di questa tecnica consiste nell'aver una risoluzione in frequenza costante, sia alle basse che alle alte frequenze, per una data risoluzione temporale.

La trasformata *Wavelet* consente di superare il limite  $\Delta f = costante$  (a parità di  $\Delta t$ ), definendo una risoluzione relativa in frequenza costante:

$$\frac{\Delta f}{f} = costante \quad (2.34)$$

Per quanto riguarda il  $\Delta t$ , questo diminuisce all'aumentare della frequenza, in accordo con il principio di indeterminazione di Heisenberg.

La trasformata *Wavelet* è il risultato della operazione (2.35):

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.35)$$

dove  $a, b \in \mathbb{R}$ , con  $a \neq 0$  se  $\psi$  è complesso, con  $a > 0$  se  $\psi \in \mathbb{R}$ .

Il parametro  $a$  è detto fattore di scala ed opera dilatazioni ( $a > 1$ ) o contrazioni ( $0 < a < 1$ ) nel tempo della *wavelet*, mentre il fattore  $b$  è detto *time shift* ed ha la funzione di spostare lungo l'asse temporale la *baby wavelet*, mostrando perciò la variazione nel tempo della CWT (vedi figura 2.8).

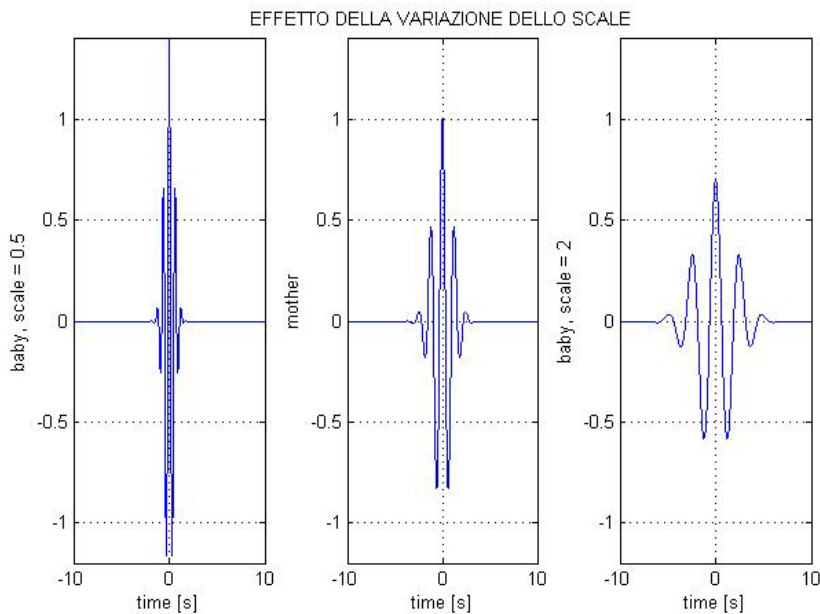


Figura 2.8 Effetto del fattore di scala sulla *mother wavelet*.

La funzione  $\psi(t)$  è definita *mother wavelet* e può essere una funzione reale o complessa. Applicando i parametri  $a$  e  $b$  alla *mother wavelet* si ottiene la *baby wavelet*:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.36)$$

Osservando la durata nel tempo della *wavelet* emergono due differenti situazioni: se il parametro  $a$  diminuisce,  $f$  aumenta e la durata della *wavelet* diminuisce, mentre se aumenta,  $f$  diminuisce e la durata della *wavelet* aumenta. Essendo la risoluzione in frequenza legata all'inverso della durata del tempo si deduce che se  $f$  diminuisce, la risoluzione in frequenza aumenta, mentre se  $f$  aumenta, la risoluzione in frequenza diminuisce.

La CWT di un generico segnale è una funzione tridimensionale dipendente dai due parametri  $a$  e  $b$ .

### 2.3.4.2. Envelope Analysis

Questa tecnica è spesso usata nella diagnostica dei difetti dei cuscinetti. Il treno di impulsi generato dall'impatto dei componenti del cuscinetto sul difetto non è esattamente periodico e uno spettro diretto, come quello ottenibile per mezzo della FFT, non consente di individuare le frequenze caratteristiche [13].

L'*envelope analysis* è in grado di estrarre le componenti impulsive periodiche anche se di energia molto limitata (e quindi nascoste dalla portante del segnale). Questa tecnica è molto indicata quindi nella diagnostica dei danneggiamenti su quelle macchine che vedono le proprie componenti di vibrazione modulare le frequenze caratteristiche dei difetti, come nel caso dei danneggiamenti dei cuscinetti volventi [9] [13] [14].

L'*envelope analysis* viene realizzata secondo questi *step*:

1. filtraggio del segnale originale  $f(t)$  attraverso un filtro passa-banda così da ottenere un segnale  $s(t)$  composto esclusivamente dalle componenti impulsive periodiche indicatrici del difetto;
2. trasformata di Hilbert al segnale  $s(t)$  per ricavare la parte immaginaria  $s_h(t)$ ;
3. scrittura del segnale analitico secondo la (2.37):

$$s_a(t) = s(t) + j s_h(t) \quad (2.37)$$

dove  $j$  indica l'unità immaginaria;

4. valutazione del valore assoluto del segnale analitico  $s_a(t)$ ;

5. trasformata di Fourier del segnale analitico per ottenere lo spettro di  $|s_a(t)|$ .

In questo modo dovrebbero essere evidenziate le componenti impulsive e periodiche presenti nel segnale che, se corrispondenti a frequenze caratteristiche dei difetti, indicano la presenza degli stessi.

### 2.3.4.3. Empirical Mode Decomposition e Hilbert-Huang Transform

La *Empirical Mode Decomposition* ha come obiettivo la scomposizione del generico segnale  $x(t)$  in una serie di funzioni o sottosegnali che rappresentano le componenti intrinseche e vengono chiamate *Intrinsic Mode Function* (IMF) [8] [10] [11].

Le IMF si differenziano per la frequenza alla quale rilasciano energia e, sommate tra di loro, permettono la ricostruzione del segnale originale (vedi figura 2.9).

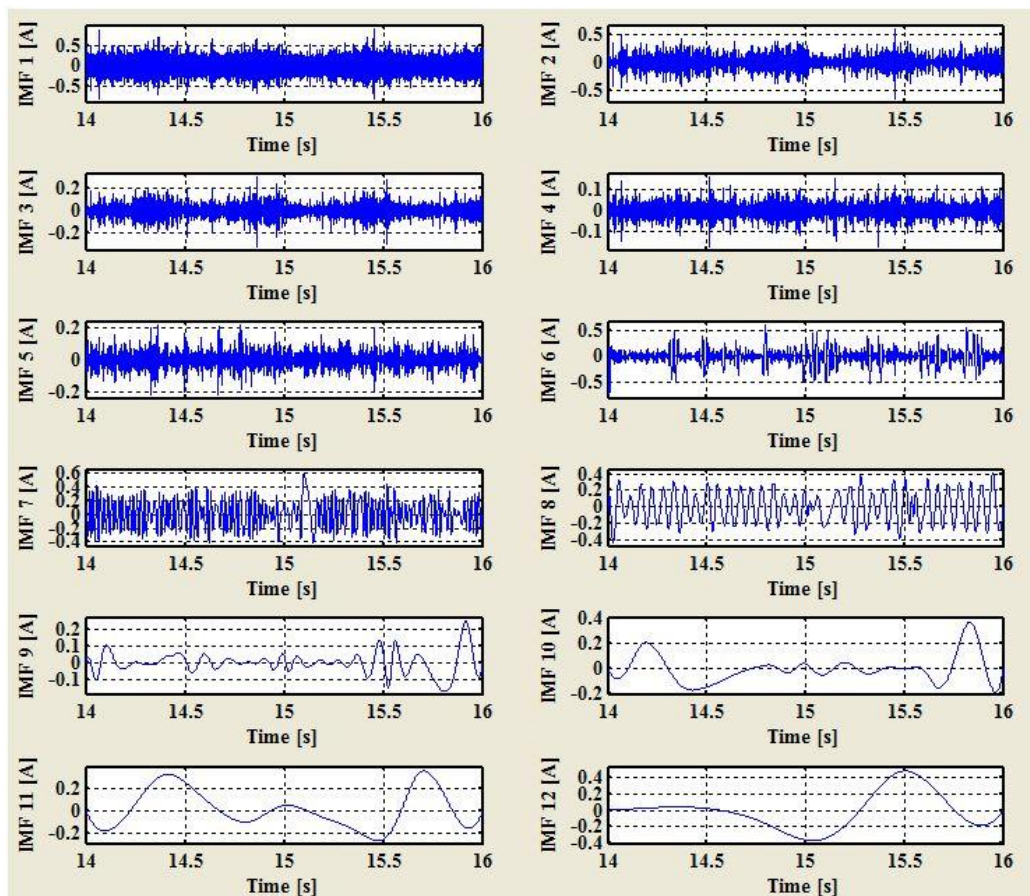


Figura 2.9 Esempio di decomposizione EMD su un segnale di corrente.



In seguito, su di esse, viene applicata la trasformata di Hilbert per calcolarne le frequenze istantanee, necessarie per ottenere lo spettro di Hilbert-Huang (HHS). Quest'ultimo è una rappresentazione tridimensionale (energia-tempo-frequenza) del segnale  $x(t)$  ed è indicativa del suo valore di energia posseduto ad ogni istante di tempo ad una certa frequenza istantanea.

La tecnica si sviluppa secondo quest'ordine:

1. scomposizione empirica di un generico segnale  $x(t)$ .  
Tale decomposizione si basa sull'estrazione diretta dell'energia associata ad ogni componente intrinseca;
2. trasformata di Hilbert delle IMF:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(t')}{t-t'} dt' \quad (2.38)$$

dove  $t'$  è lo sfasamento temporale e P il valore principale di Cauchy;

3. costruzione del segnale analitico:

$$s_a(t) = x(t) + j Y(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.39)$$

4. calcolo di modulo e fase:

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + Y(t)^2} \quad (2.40)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left[ \frac{Y(t)}{x(t)} \right] \quad (2.41)$$

5. calcolo della frequenza istantanea IF [Hz] (*Istantaneous Frequency*):

$$IF = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2.42)$$

La frequenza istantanea così calcolata associa il segnale ad un solo valore di frequenza a ciascun istante temporale;

6. creazione dello spettro di Hilbert-Huang HHS (*Hilbert-Huang Spectrum*).

#### 2.3.4.4. Spectral Kurtosis

La *Spectral Kurtosis* (SK) viene introdotta da Dwyer [16] come una tecnica statistica che potesse individuare in un segnale non solo le componenti non-Gaussiane, ma anche la loro posizione nel dominio delle frequenze.

Dwyer ha definito inizialmente la SK come il momento del quarto ordine normalizzato della parte reale della trasformata *Short Time Fourier Transform* (STFT) [16].

In seguito Pagnan e Ottonello hanno proposto la modifica della definizione della SK basandosi sul momento del quarto ordine normalizzato della magnitudo della trasformata della STFT [16].

Successivamente Antoni ha proposto la formalizzazione di questa tecnica applicata a fenomeni non-stazionari [16].

Molti danneggiamenti di macchine rotanti producono una serie di impatti che generano un treno di impulsi con caratteristiche variabili nel tempo che si traducono in segnali tipicamente non-stazionari, come nel caso dei danneggiamenti sui cuscinetti volventi [16] [17] [19].

In questo lavoro di tesi viene presentata la SK basata sulla decomposizione di Wold-Cramér per fenomeni *conditionally non-stationary* (condizionatamente non stazionari, CNS).

La decomposizione di Wold descrive un processo casuale stazionario come un sistema casuale, lineare, tempo-invariante eccitato unicamente da rumore bianco:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t h(t - \tau) X(\tau) d\tau \quad (2.43)$$

dove  $X(t)$  rappresenta il segnale originale e  $h(t)$  la risposta all'impulso.

La decomposizione impone solo una restrizione sul segnale  $X(t)$ , cioè che esso abbia uno spettro piatto su quasi tutte le frequenze. Per semplicità si assume che  $X(t)$  abbia una funzione di densità di probabilità simmetrica.

La controparte della decomposizione di Wold è conosciuta decomposizione di Cramér ed è definita dalla (2.44):

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(f) dX(f) \quad (2.44)$$

dove  $H(f)$  è la trasformata di Fourier della risposta all'impulso  $h(t)$  e  $dX(f)$  è associato a  $X(t)$  secondo la (2.45):

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} dX(f) \quad (2.45)$$

Per estendere la decomposizione di Wold a processi non-stazionari si deve rendere  $h(t)$  tempo-variante:

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t h(t, t - \tau) X(\tau) d\tau \quad (2.46)$$

Similarmente viene modificata anche la decomposizione di Cramér secondo la (2.47):

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(t, f) dX(f) \quad (2.47)$$

dove  $H(t, f)$  è la trasformata di Fourier della risposta all'impulso tempo-variante  $h(t, s)$ .

In questo modo la funzione di trasferimento tempo-variante  $H(t, f)$  può essere interpretata come la *complex envelope* o la *complex demodulate* di  $Y(t)$  alla frequenza  $f$ .

In molte situazioni la funzione di trasferimento  $H(t, f)$  risulta essere stocastica piuttosto che deterministica. In questi casi una descrizione più completa del processo  $Y(t)$  è data dalla (2.48):

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi ft} H(t, f; \varpi) dX(f) \quad (2.48)$$

dove  $H(t, f; \varpi)$  è la *complex envelope* la cui forma dipende da  $\varpi$  (variabile random).

In questo caso anche  $H(t, f; \varpi)$  diventa una funzione stocastica.

Per semplicità si considera che  $H(t, f; \varpi)$  sia stazionario e indipendente da  $dX(f)$ .

Come conseguenza i processi descritti da questa funzione diventano stazionari in generale, ma non-stazionari per un particolare valore di  $\varpi$  (processi *conditionally non-stationary*) [16].

Di particolare interesse per caratterizzare questi processi è la *Spectral Kurtosis*.

Per definirla è necessario partire dal concetto di cumulata spettrale.

La cumulata spettrale del quarto ordine è definita dalla (2.49) [16]:

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y}(f) - 2S_{2Y}^2(f) \quad f \neq 0 \quad (2.49)$$

dove  $S_{4Y}(f)$  indica il momento spettrale del quarto ordine e  $S_{2Y}(f)$  indica il momento spettrale del secondo ordine.

Normalizzata sull'energia, la cumulata spettrale restituisce la misura della *piccosità* della funzione di densità di probabilità del processo alla frequenza  $f$ . Si definisce così la *Spectral Kurtosis* [16]:

$$K_Y(f) = \frac{C_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} = \frac{S_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} - 2 \quad f \neq 0 \quad (2.50)$$

Si può associare alla *Spectral Kurtosis* una interpretazione fisica più interessante della sua interpretazione in termini statistici di cumulata: essa può essere vista come una misura della dispersione temporale della distribuzione di energia del segnale nel dominio tempo-frequenza.

Inoltre la *Spectral Kurtosis* è molto sensibile alla presenza di componenti non-stazionarie nel segnale ed è in grado di indicare esattamente a quale frequenza queste componenti si trovano.

La *Spectral Kurtosis* così definita gode delle seguenti proprietà [16]:

- la SK di un processo CNS è data dalla (2.51):

$$K_Y(f) = \gamma_{4H}(f)[2 + k_X] - 2 \geq k_X \quad f \neq 0 \quad (2.51)$$

dove  $\gamma_{4H}$  è definito dalla (2.52):

$$\gamma_{4H}(f) = \frac{E\{|H(t, f)|^4\}}{E\{|H(t, f)|^2\}^2} \quad (2.52)$$

e  $k_X$  indica l'indice di Kurtosi di  $X(t)$ ;

- la SK di un processo CNS guidato da un processo Gaussiano è data dalla (2.53):

$$K_Y(f) = 2[\gamma_{4H}(f) - 1] \geq 0 \quad f \neq 0 \quad (2.53)$$

questa proprietà evidenzia ancora una volta che la non-stazionarietà di un processo CNS induce una distribuzione non-Gaussiana;

- la SK di un processo puramente stazionario (quindi non CNS) è indipendente dalla frequenza ed è data dalla (2.54):

$$K_Y(f) = k_X \quad f \neq 0 \quad (2.54)$$

questa proprietà mette in relazione la SK di un processo stazionario con il valore del suo indice di Kurtosi;

- la SK di un processo puramente stazionario Gaussiano è nulla:

$$K_Y(f) = 0 \quad f \neq 0 \quad (2.55)$$

- la SK di un processo CNS  $Z(t) = Y(t) + N(t)$ , dove  $N(t)$  rappresenta il rumore indipendente da  $Y(t)$ , è data dalla (2.56):

$$K_Z(f) = \frac{K_Y(f)}{[1 + \rho(f)]^2} + \frac{\rho(f)^2 K_N}{[1 + \rho(f)]^2} \quad f \neq 0 \quad (2.56)$$

dove  $\rho(f)$  indica il rapporto rumore-segnale ed è definito dalla (2.57):

$$\rho(f) = \frac{S_{2N}(f)}{S_{2Y}(f)} \quad (2.57)$$

- la SK di un processo CNS  $Z(t) = Y(t) + N(t)$ , dove  $N(t)$  rappresenta il rumore Gaussiano indipendente da  $Y(t)$ , è data dalla (2.58):

$$K_Z(f) = \frac{K_Y(f)}{[1 + \rho(f)]^2} \quad f \neq 0 \quad (2.58)$$

In generale, per un processo non stazionario, la *Spectral Kurtosis* dipende sia dalla frequenza che dalla risoluzione in frequenza [19].

E' stato dimostrato che esiste una combinazione ottimale di frequenza  $f$  e di risoluzione in frequenza  $\Delta f$  che massimizza la *Spectral Kurtosis*: si capisce quindi come sia necessaria una rappresentazione della *Spectral Kurtosis* su di un piano  $(f, \Delta f)$  detto *Kurtogram* (vedi figura 2.10) [19].

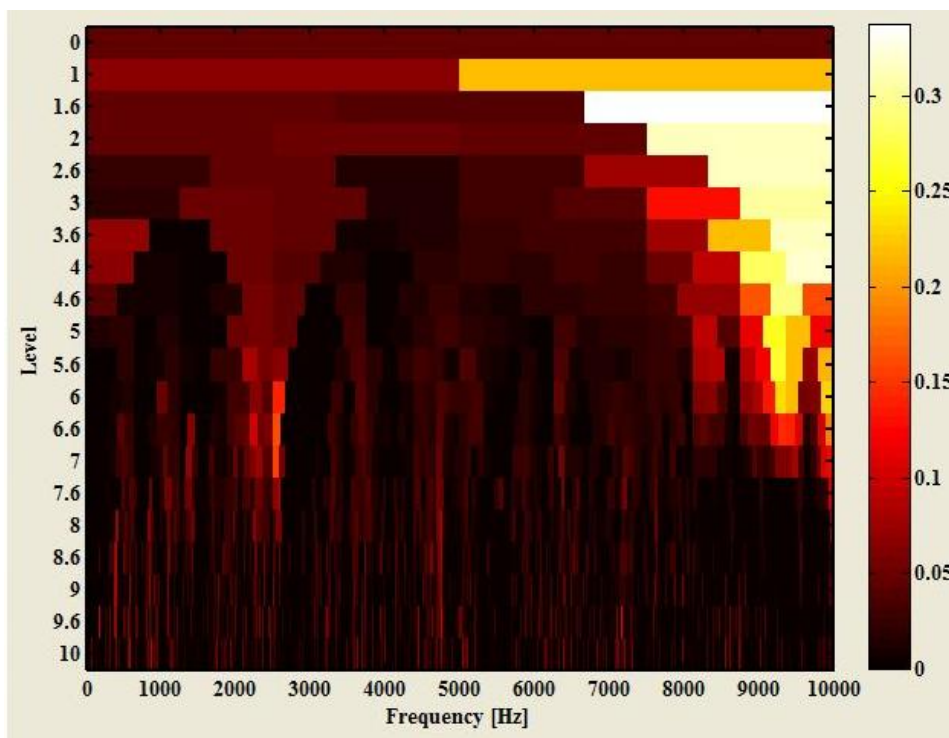


Figura 2.10 Kurtogram.

### 3. DESCRIZIONE DEL BANCO PROVA PER LA DIAGNOSTICA DEL SISTEMA DI TRAZIONE DEL TRENO AD ALTA VELOCITA'

Nella prima parte di questo lavoro di tesi sono stati analizzati i dati provenienti da un banco prova allestito per la diagnostica dei cuscinetti del gruppo motore-trasmissione di un treno ad alta velocità. Si tratta di un classico schema MTU (motore-trasmissione-utilizzatore):

- **Motore:** REGINA, pilotato con inverter (in nero in figura 3.2);
- **Trasmissione:** riduttore a ruote a denti elicoidali, rapporto di trasmissione  $\tau = 85/26 = 3.27$  (in nero in figura 3.2);
- **Utilizzatore:** motore treno (in rosso in figura 3.1) con riduttore a ruote a denti elicoidali (in bianco in figura 3.1), rapporto di trasmissione  $\tau = 71/27 = 2.63$ .

Per simulare il comportamento del treno sulla tratta Milano-Roma si utilizzano coppie di viti a ricircolo di sfere per movimentare i componenti del sistema MTU sul piano verticale (vedi figure 3.1 e 3.2).



Figura 3.1 Banco prova per la simulazione del sistema di trazione del treno ad alta velocità.

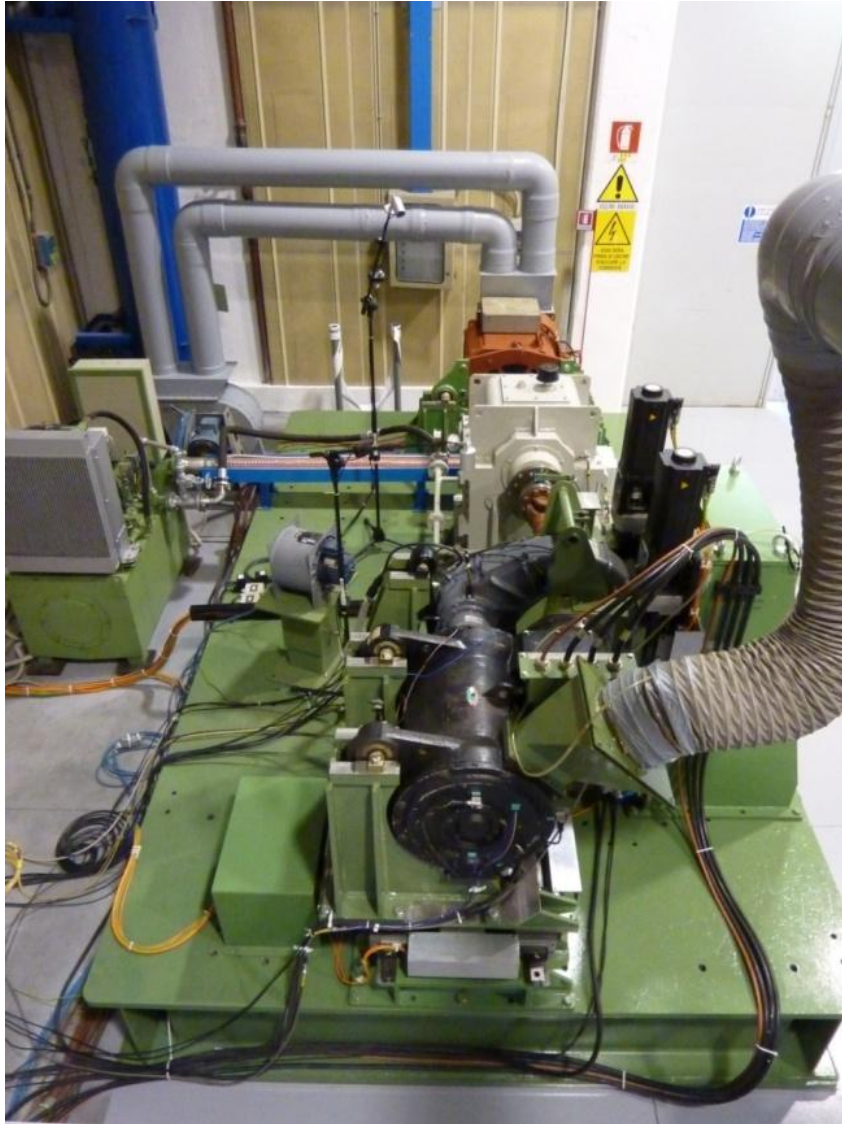


Figura 3.2 Ulteriore vista del banco prova.

### 3.1. Strumentazione del banco prova

Per studiare il comportamento del gruppo MTU quando su di esso sono montati cuscinetti integri o danneggiati si è deciso di acquisire segnali di vibrazione. A tal scopo il banco prova è stato strumentato con accelerometri uniassiali e triassiali posti sul motore REGINA e sulla trasmissione, in prossimità dei cuscinetti e sulla cassa del corpo motore e del corpo riduttore. In totale sono presenti 35 canali di acquisizione. La frequenza di acquisizione è pari a 20 kHz.



In tabella 3.1 sono riportati tutti i sensori utilizzati sul banco prova.

**Tabella 3.1 Sensori che equipaggiano il banco prova.**

<b>N.</b>	<b>Signal</b>	<b>Sensor</b>	<b>Position</b>	<b>Type</b>	<b>Sensitivity</b>
1	S01-A	Single accelerometer	GP3 Z+	Acceleration	100 mV/g
2	S02-A	Single accelerometer	GP3 Z-	Acceleration	100 mV/g
3	S03-AD	Dual accelerometer	GP3 X	Acceleration	100 mV/g
4	S04-A	Single accelerometer	GP2 Z-	Acceleration	100 mV/g
5	S05-AD	Dual accelerometer	GP2 X	Acceleration	100 mV/g
6	S06-A	Single accelerometer	GP1 Y	Acceleration	100 mV/g
7	S07-A	Single accelerometer	GP5 Z+	Acceleration	100 mV/g
8	S08-A	Single accelerometer	GP5 Z-	Acceleration	100 mV/g
9	S09-AD	Dual accelerometer	GP5 X	Acceleration	100 mV/g
10	S10-A	Single accelerometer	GP5 Y	Acceleration	100 mV/g
11	S11-A	Single accelerometer	GP4 Z+	Acceleration	100 mV/g
12	S12-A	Single accelerometer	GP4 Z-	Acceleration	100 mV/g
13	S13-AD	Dual accelerometer	GP4 X	Acceleration	100 mV/g
14	S14-A	Single accelerometer	GP4 Y	Acceleration	100 mV/g
15	S15-A	Single accelerometer	MP2 Z- Flange	Acceleration	100 mV/g
16	S16-A	Single accelerometer	MP2 X Flange	Acceleration	100 mV/g
17	S17-A	Single accelerometer	MP1 Z- Flange	Acceleration	100 mV/g
18	S18-A	Single accelerometer	MP1 X Flange	Acceleration	100 mV/g
19	S19-A	Single accelerometer	MP2 Y	Acceleration	100 mV/g
20	S22-A	Single accelerometer	MP2 Z- Inner	Acceleration	100 mV/g
21	S23-A	Single accelerometer	MP2 X Inner	Acceleration	100 mV/g
22	S24-A	Single accelerometer	MP1 Z- Inner	Acceleration	100 mV/g
23	S25-A	Single accelerometer	MP1 X Inner	Acceleration	100 mV/g
24	S26-AT1	Triaxial	MP	Acceleration	10 mV/g
25	S26-AT2	Triaxial	MP	Acceleration	10 mV/g
26	S26-AT3	Triaxial	MP	Acceleration	10 mV/g
27	S27-AT1	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
28	S27-AT2	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
29	S27-AT3	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
30	S28-AT1	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
31	S28-AT2	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
32	S28-AT3	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
33	S29-AT1	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
34	S29-AT2	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g
35	S29-AT3	Triaxial	GP	Acceleration	10 mV/g

Nella figura 3.3 viene rappresentata una parte del banco prova comprendente il motore e la trasmissione, mentre l'utilizzatore con il suo riduttore non è stato rappresentato. Quest'ultimo è calettato sull'asse denominato *wheel axle* e si trova a sinistra rispetto al sistema riportato. La codifica presente in figura 3.3 fa riferimento a quella riportata in tabella 3.1 e si basa sul diverso posizionamento dei cuscinetti.

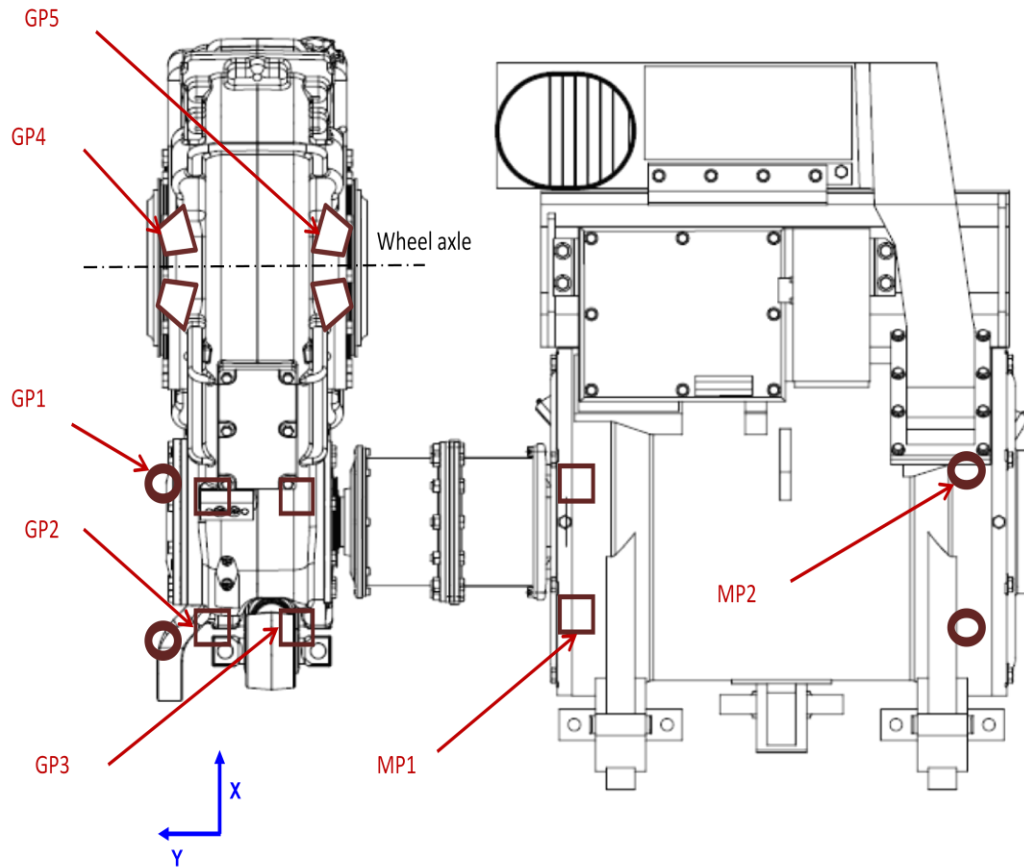


Figura 3.3 Posizionamento dei sensori sul sistema di trazione.

### 3.2. Tipologia di cuscinetti montati sul banco

Sul banco prova sono stati utilizzati cuscinetti di diversa tipologia. Nella figura 3.4 è indicato il loro posizionamento nel sistema di trazione e la loro codifica basata sulla tipologia di cuscinetto.

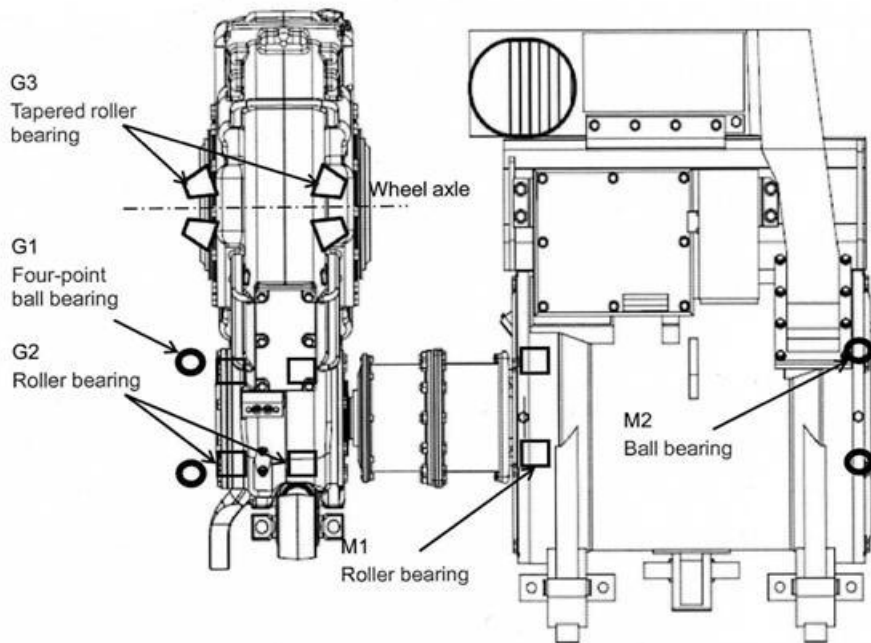


Figura 3.4 Posizione e codifica dei cuscinetti.

I cuscinetti impiegati sono riportati nelle tabelle 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

Tabella 3.2 Caratteristiche geometriche cuscinetto M1.

Cuscinetto a rulli cilindrici	M1
Diametro anello interno [mm]	83.5
Diametro anello esterno [mm]	113.5
Diametro elemento volvente [mm]	15
Diametro di <i>pitch</i> [mm]	98.5
Numero elementi volventi	17
Angolo di contatto [deg.]	0

**Tabella 3.3 Caratteristiche geometriche cuscinetto M2.**

<b>Cuscinetto a sfere</b>	<b>M2</b>
Diametro anello interno [mm]	80.832
Diametro anello esterno [mm]	114.168
Diametro elemento volvente [mm]	16.668
Diametro di <i>pitch</i> [mm]	97.5
Numero elementi volventi	11
Angolo di contatto [deg.]	0

**Tabella 3.4 Caratteristiche geometriche cuscinetto G1.**

<b>Cuscinetto a sfere</b>	<b>G1</b>
Diametro anello interno [mm]	85.038
Diametro anello esterno [mm]	119.962
Diametro elemento volvente [mm]	17.462
Diametro di <i>pitch</i> [mm]	102.5
Numero elementi volventi	16
Angolo di contatto [deg.]	0

**Tabella 3.5 Caratteristiche geometriche cuscinetto G2.**

<b>Cuscinetto a rulli cilindrici</b>	<b>G2</b>
Diametro anello interno [mm]	88.5
Diametro anello esterno [mm]	118.5
Diametro elemento volvente [mm]	15
Diametro di <i>pitch</i> [mm]	103.5
Numero elementi volventi	18
Angolo di contatto [deg.]	0

**Tabella 3.6 Caratteristiche geometriche cuscinetto G3.**

<b>Cuscinetto a rulli conici</b>	<b>G3</b>
Diametro anello interno [mm]	236
Diametro anello esterno [mm]	267
Diametro elemento volvente [mm]	17.37
Diametro di <i>pitch</i> [mm]	258.864
Numero elementi volventi	39
Angolo di contatto [deg.]	12

### 3.3. Tipologia dei test effettuati

Sono stati effettuati 36 test strutturati con varie combinazioni di cuscinetti (per la disposizione dei cuscinetti secondo la codifica contenuta nella tabella seguente si faccia riferimento alla figura 3.3).

Ad ogni codice contenuto in tabella 3.7 (per esempio BM1-02) corrisponde uno specifico danneggiamento (vedi paragrafo 3.4).

I test 00, 09, 18, 23 ,40 sono test di riferimento: sono stati effettuati per conoscere il comportamento del sistema di trazione in condizioni di normale funzionamento (cuscinetti integri) e per verificare che, dopo alcuni test con cuscinetti danneggiati, il sistema non presenti comportamenti anomali dovuti a continui smontaggi e rimontaggi.

Ogni test è stato effettuato seguendo un determinato profilo di velocità, consistente in prove di accelerazione, decelerazione e a velocità costante.

E' presente in ogni test un periodo di *warm-up* per portare il motore a regime di temperatura e due periodi di *cooling* per controllare le temperature di esercizio.

Il *warm-up* è effettuato con una velocità del motore corrispondente alla velocità di 160 km/h del treno, mentre i periodi di *cooling* sono effettuati a motore fermo.

Inoltre parte del test è condotto con velocità negative (inversione del senso di rotazione del motore).

Il profilo di ogni test è riportato nella figura 3.5.

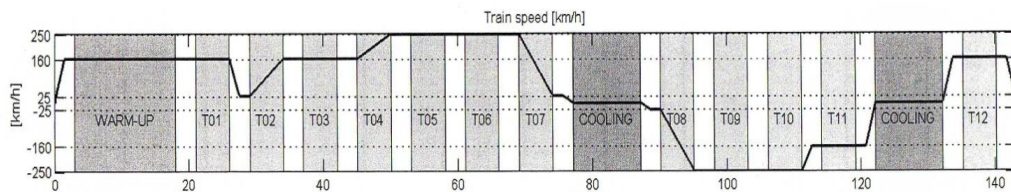


Figura 3.5 Profilo di velocità.

Come si può notare dalla figura 3.5 la durata dell'intero test è di circa 140 minuti in cui sono presenti 12 periodi di acquisizione, ognuno dei quali ha una durata pari a 3 minuti.

Per l'analisi dei dati di vibrazione non si è considerata l'intera lunghezza del segnale campionato, ma ci si è concentrati solo su di una parte di esso della durata di 10 s.

I periodi oggetto di studio per l'analisi dei segnali di vibrazione sono:

- T01 – velocità costante pari a 160 km/h;
- T04 – rampa di velocità da 160 km/h a 250 km/h;
- T05 – velocità costante pari a 250 km/h;
- T12 – velocità costante pari a 160 km/h.

Per l'analisi dei dati di tensione e corrente si hanno a disposizione solamente i dati riguardanti l'ultimo secondo di acquisizione del periodo 12 (T12) e non l'intero test, in quanto questo banco prova non è stato progettato con l'intento di sfruttare questo tipo di dati per la diagnostica dei cuscinetti volventi.

**Tabella 3.7** Tabella sintetica dei danneggiamenti.

<b>TST</b>	<b>DANNEGGIAMENTO</b>	<b>POSIZIONE</b>
00	Cuscinetti integri	
02	BG1-03	GP1
03	BG1-02	GP1
04	BG1-04	GP1
05	BG1-05	GP1
06	BG1-06	GP1
07	BG1-07	GP1
08	BG1-08	GP1
09	Cuscinetti integri	
10	BG2-03	GP2
11	BG2-04	GP2
12	BG2-05	GP2
13	BG2-06	GP2
14	BG2-07	GP3
15	BG2-08	GP3
16	BG2-09	GP3
17	BG2-06	GP3
18	Cuscinetti integri	
23	Cuscinetti integri	
24	BM1-02	MP1
25	BM1-03	MP1
26	BM1-04	MP1
27	BM1-05	MP1
28	BM1-06	MP1
29	BM1-07	MP1
30	BM1-08	MP1
31	BM1-09	MP1
32	BM1-10	MP1
33	BM1-11	MP1
34	BM1-12	MP1
35	BM1-13	MP1
36	BM2-02	MP2
37	BM2-03	MP2
38	BM2-05	MP2
39	BM2-06	MP2
40	Cuscinetti integri	

### 3.4. Danneggiamento dei cuscinetti

Ogni cuscinetto ha subito una serie di danneggiamenti di diversa entità e posizione, contrassegnati da una sigla.

Per non rendere lunga e pesante la trattazione, vengono riportati nelle tabelle 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 i danneggiamenti dei test ritenuti più significativi.

Si fa presente che la codifica  $BM_x$ ,  $BG_x$  corrisponde alla codifica  $M_x$ ,  $G_x$  (per esempio la codifica  $BM1$  corrisponde a  $M1$ ).

Tabella 3.8 Codifica danneggiamenti cuscinetto BM1.



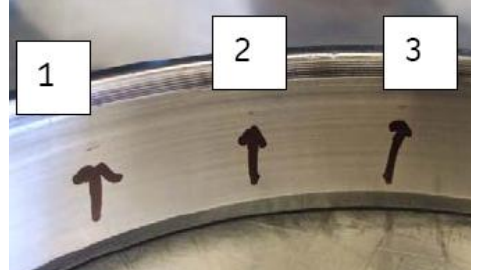

CODIFICA	DESCRIZIONE	
BM1 – 03	difetto di medie dimensioni dovuto a elettroerosione su anello interno	
BM1 – 04	difetto di medie dimensioni dovuto a elettroerosione su anello esterno	
BM1 – 10	difetto dovuto ad errato montaggio su anello esterno (difetto al centro della pista)	
BM1 – 13	difetto dovuto a scheggiatura di medie dimensioni su anello esterno	

Tabella 3.9 Codifica danneggiamenti cuscinetto BM2.





CODIFICA	DESCRIZIONE	
BM2 – 02	difetto dovuto a scheggiatura di piccole dimensioni su elemento volvente	
BM2 – 05	difetto dovuto a scheggiatura di piccole dimensioni su anello interno	



Tabella 3.10 Codifica danneggiamenti cuscinetto BG1.

CODIFICA	DESCRIZIONE	
BG1 – 03	difetto dovuto a scheggiatura di medie dimensioni su anello interno	
BG1 – 04	difetto dovuto a scheggiatura di piccole dimensioni su elemento volvente	
BG1 – 07	difetto consistente in aumento del gioco assiale su anello interno dovuto a errato montaggio	
BG1 – 08	difetto dovuto ad ossidazione di elemento volvente, anello interno ed anello esterno	

Tabella 3.11 Codifica danneggiamenti cuscinetto BG2.

CODIFICA	DESCRIZIONE	
BG2 – 05	difetto dovuto a scheggiatura di piccole dimensioni su elemento volvente	
BG2 – 06	difetto dovuto a scheggiatura di medie dimensioni su elemento volvente	
BG2 – 07	difetto dovuto a errato montaggio su gabbia	
BG2 – 09	difetto dovuto a scheggiatura su anello interno	

### 3.5. Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione

In tabella 3.12 vengono indicate le frequenze caratteristiche dei componenti meccanici montati sul banco (per la loro definizione vedi paragrafo 2.1). Le frequenze caratteristiche dei cuscinetti sono state calcolate ipotizzando angolo di contatto nullo, tranne che nel caso di cuscinetto a rulli conici (G3).

Nel T04, essendo un test in transitorio, si è dovuto per necessità considerare una velocità media tra i valori 160 km/h e 250 km/h, cioè 205 km/h.

**Tabella 3.12** Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione.

	<b>T01 – T12</b>	<b>T04</b>	<b>T05</b>
Train speed [km/h]	160	205	250
REGINA rotating frequency [Hz]	52.86	67.18	82.59
Wheel shaft rotating frequency [Hz]	16.17	20.55	25.26
464 rotating frequency [Hz]	42.52	54.04	66.43
Gearbox mesh frequency [Hz]	1374.29	1746.64	2147.33
Converter supply frequency [Hz]	105.71	134.36	165.18
M1 – BPFO [Hz]	380.87	484.06	595.11
M1 – BPFI [Hz]	517.71	657.97	808.92
M1 – FTF [Hz]	22.40	28.47	35.01
M1 – BSF [Hz]	169.52	215.45	264.88
M2 – BPFO [Hz]	241.02	306.32	376.59
M2 – BPFI [Hz]	340.41	432.65	531.90
M2 – FTF [Hz]	21.91	27.85	34.24
M2 – BSF [Hz]	150.08	190.74	234.50
G1 – BPFO [Hz]	350.82	445.87	548.16
G1 – BPFI [Hz]	494.90	628.98	773.28
G1 – FTF [Hz]	21.93	27.87	34.26
G1 – BSF [Hz]	150.63	191.44	235.36
G2 – BPFO [Hz]	406.77	516.98	635.58
G2 – BPFI [Hz]	544.66	692.23	851.03
G2 – FTF [Hz]	22.60	28.72	35.31
G2 – BSF [Hz]	178.53	226.90	278.95
G3 – BPFO [Hz]	297.43	378.01	464.73
G3 – BPFI [Hz]	333.13	423.39	520.52
G3 – FTF [Hz]	7.63	9.69	11.92
G3 – BSF [Hz]	120.09	152.63	187.64

### 3.6. Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente

Per l'analisi di segnali ricavati dalla misura di tensione e corrente è necessario considerare ulteriori frequenze caratteristiche indicate in tabella 3.13 (per la loro definizione vedi paragrafo 2.2).

**Tabella 3.13** Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente.

	T01 – T12	T04	T05
Train speed [km/h]	160	205	250
REGINA rotating frequency $f_r$ [Hz]	52.86	67.18	82.59
Converter supply frequency $f_s$ [Hz]	105.71	134.36	165.18
<b>Cuscinetto M1</b>			
$f_g$ [Hz]	22.40	28.47	35.01
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$105.71 \pm k 380.87$	$134.36 \pm k 484.06$	$165.18 \pm k 595.11$
$f =  f_s \pm f_r \pm k BPF1 $ [Hz]	$105.71 \pm k 52.86 \pm k 517.71$	$134.36 \pm k 67.18 \pm k 657.97$	$165.18 \pm k 82.59 \pm k 808.92$
$f =  f_s \pm f_g \pm k BSF $ [Hz]	$105.71 \pm k 22.40 \pm k 169.52$	$134.36 \pm k 28.47 \pm k 215.45$	$165.18 \pm k 35.01 \pm k 264.88$
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$105.71 \pm k 380.87$	$134.36 \pm k 484.06$	$165.18 \pm k 595.11$
$f =  f_s \pm k BPF1 $ [Hz]	$105.71 \pm k 517.71$	$134.36 \pm k 657.97$	$165.18 \pm k 808.92$
$f =  f_s \pm k BSF $ [Hz]	$105.71 \pm k 169.52$	$134.36 \pm k 215.45$	$165.18 \pm k 264.88$
<b>Cuscinetto M2</b>			
$f_g$ [Hz]	21.91	27.85	34.24
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$105.71 \pm k 241.02$	$134.36 \pm k 306.32$	$165.18 \pm k 376.59$
$f =  f_s \pm f_r \pm k BPF1 $ [Hz]	$105.71 \pm k 52.86 \pm k 340.41$	$134.36 \pm k 67.18 \pm k 432.65$	$165.18 \pm k 82.59 \pm k 531.90$
$f =  f_s \pm f_g \pm k BSF $ [Hz]	$105.71 \pm k 21.91 \pm k 150.08$	$134.36 \pm k 27.85 \pm k 190.74$	$165.18 \pm k 34.24 \pm k 234.50$
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$105.71 \pm k 241.02$	$134.36 \pm k 306.32$	$165.18 \pm k 376.59$
$f =  f_s \pm k BPF1 $ [Hz]	$105.71 \pm k 340.41$	$134.36 \pm k 432.65$	$165.18 \pm k 531.90$
$f =  f_s \pm k BSF $ [Hz]	$105.71 \pm k 150.08$	$134.36 \pm k 190.74$	$165.18 \pm k 234.50$

## 4. ANALISI DEI DATI DEL BANCO PROVA PER IL SISTEMA DI TRAZIONE DEL TRENO AD ALTA VELOCITA'

I dati provenienti dal banco prova allestito per la diagnostica del sistema di trazione di un treno ad alta velocità sono stati analizzati mediante l'utilizzo di un programma realizzato in linguaggio *Matlab*. Quest'ultimo permette di applicare tutte le tecniche di analisi dei segnali descritte nel paragrafo 2.3.

In particolare per analizzare i segnali provenienti da sensori di vibrazione si è utilizzata la *Spectral Kurtosis* (SK) mentre per i segnali di tensione e corrente la medesima tecnica ha evidenziato solamente componenti elettriche di funzionamento del motore (vedi figura 4.2). Quindi si sono utilizzate altre tecniche tutte basate sulla *Empirical Mode Decomposition* (EMD). Quest'ultima scompone il segnale di partenza in bande di frequenza ed è quindi più probabile che esalti il contributo delle frequenze caratteristiche dei difetti. Le tecniche proposte sono: EMD seguita da *Fourier Transform*, EMD seguita da *Envelope Analysis* ed EMD seguita da *Spectral Kurtosis*.

In seguito sono stati confrontati i risultati.

### 4.1. Analisi dei dati di vibrazione

Al fine di analizzare i dati il programma permette di selezionare il test e, all'interno di ognuno, permette di scegliere il canale da analizzare.

Applicando la tecnica SK il programma restituisce il *Kurtogram* come una immagine 2D con notazione a colori (vedi figura 4.1).

All'interno del *Kurtogram* è necessario selezionare una banda ad elevata energia (colore più chiaro, tendente al bianco) dove è più probabile che sia contenuta l'informazione riguardante il danneggiamento del cuscinetto. Una volta selezionata la banda, si ottiene una distribuzione in frequenza del tutto analoga ad uno spettro (vedi figura 4.2). In quest'ultimo si ricercano le frequenze caratteristiche indicate nel paragrafo 3.5. E' necessario porre attenzione alla larghezza della banda in frequenza: più la banda è stretta, minore è il numero dei punti sull'asse delle frequenze nello spettro del segnale selezionato.

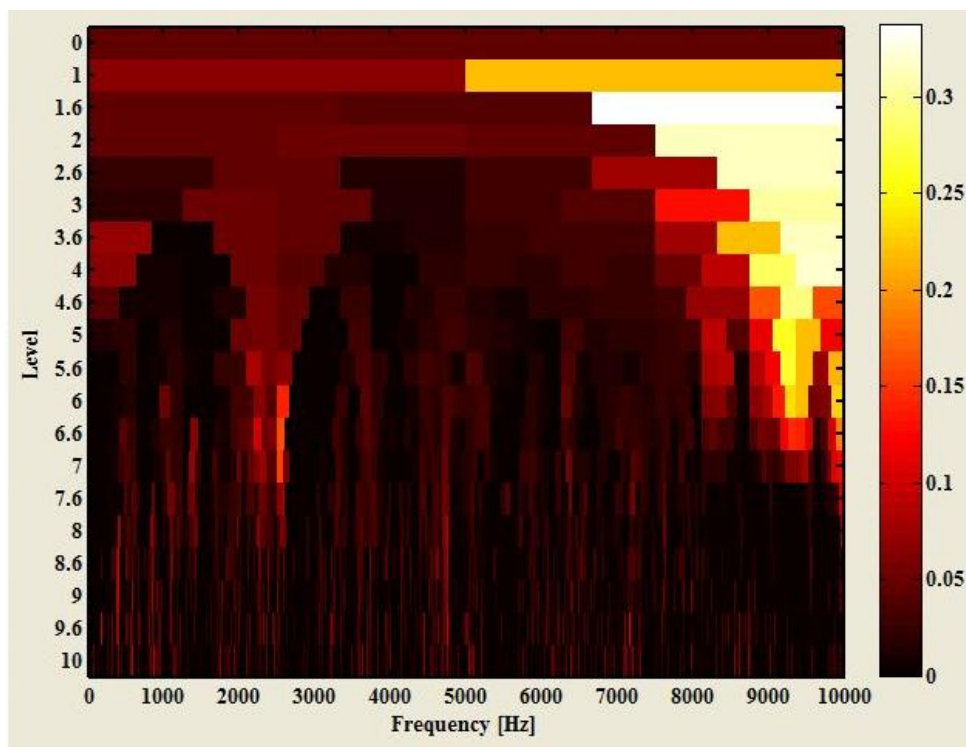


Figura 4.1 Kurtogram.

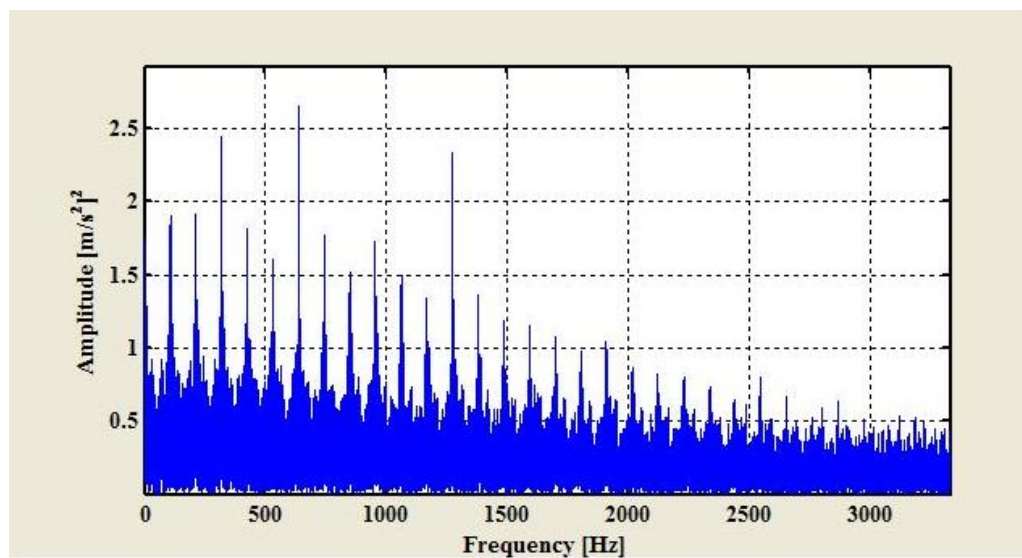


Figura 4.2 Spettro del segnale di corrente ottenuto applicando direttamente la SK.

Vengono di seguito riportati i risultati delle analisi condotte con questa tecnica sui test più significativi.

#### 4.1.1. Test di riferimento: TST 00

Il TST 00 è un test di riferimento che vede il montaggio di cuscinetti integri sul sistema di trazione. Esso rappresenta il termine di paragone per le successive analisi.

E' possibile riconoscere distintamente la frequenza di alimentazione e le sue armoniche di ordine superiore (vedi figure da 4.3 a 4.13).

In tutti gli spettri, ad ogni velocità di rotazione testata, risulta predominante la componente elettrica (*supply frequency*) e le sue armoniche superiori.

Solo in qualche caso compare la frequenza di rotazione del motore REGINA, con ampiezza ridotta rispetto all'ampiezza della componente elettrica.

Vengono di seguito riportati gli spettri riguardanti tutti i canali che vengono poi discussi nei test successivi.

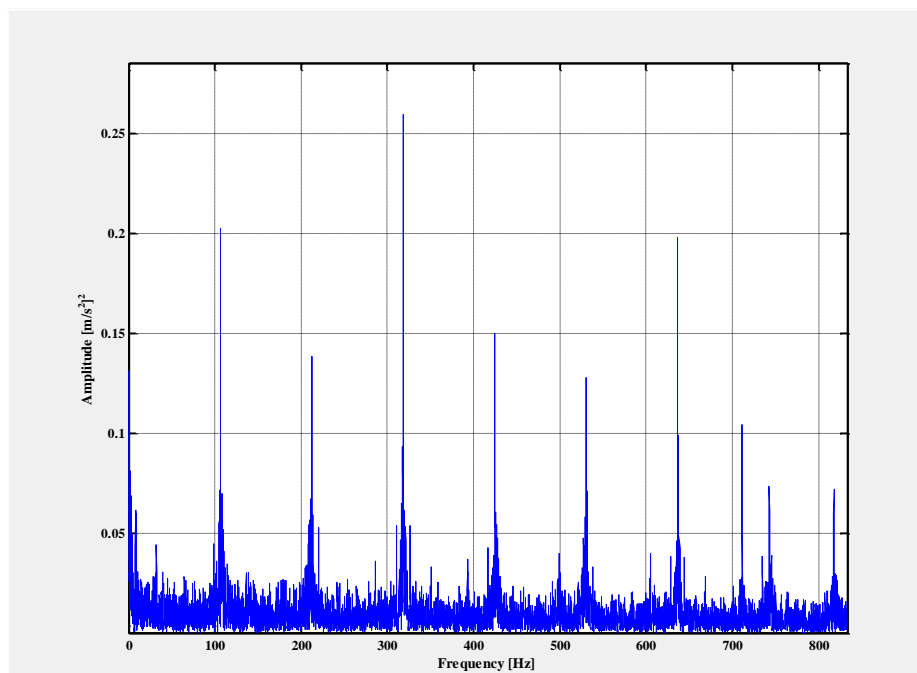


Figura 4.3 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S23-A).

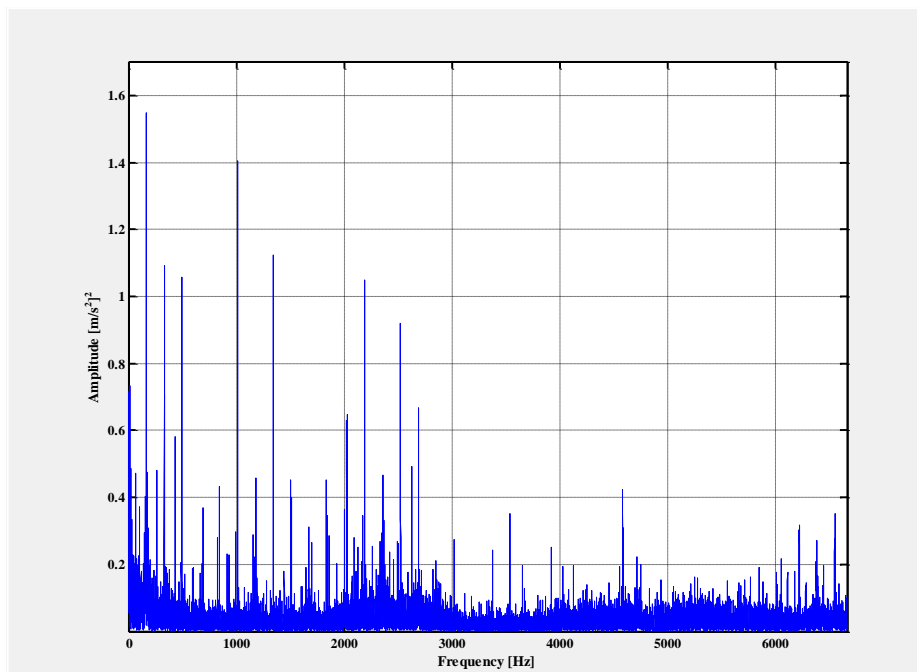


Figura 4.4 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 05, canale S24-A).

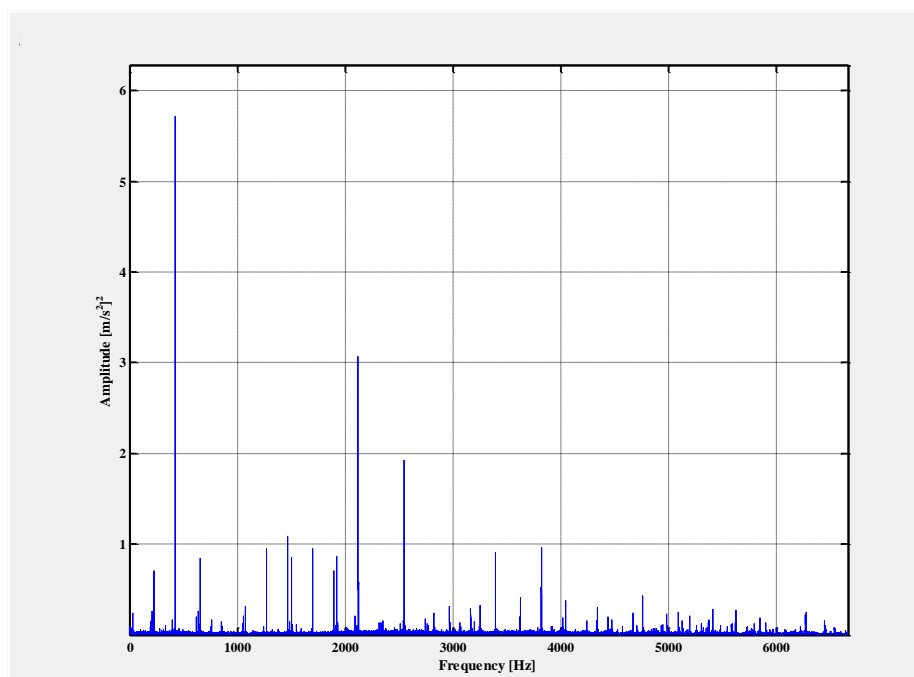


Figura 4.5 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S17-A).



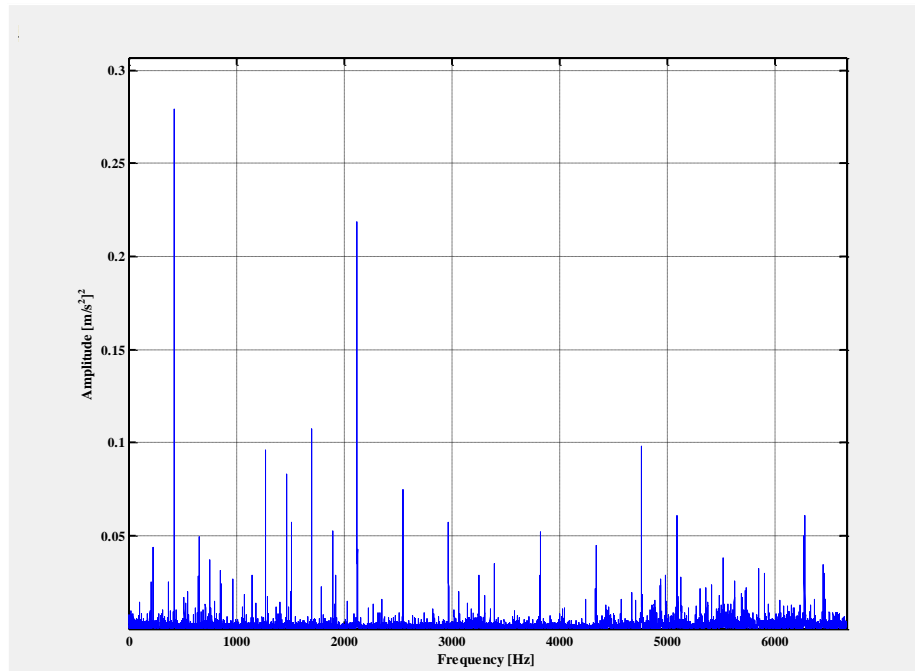


Figura 4.6 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S26-AT1).

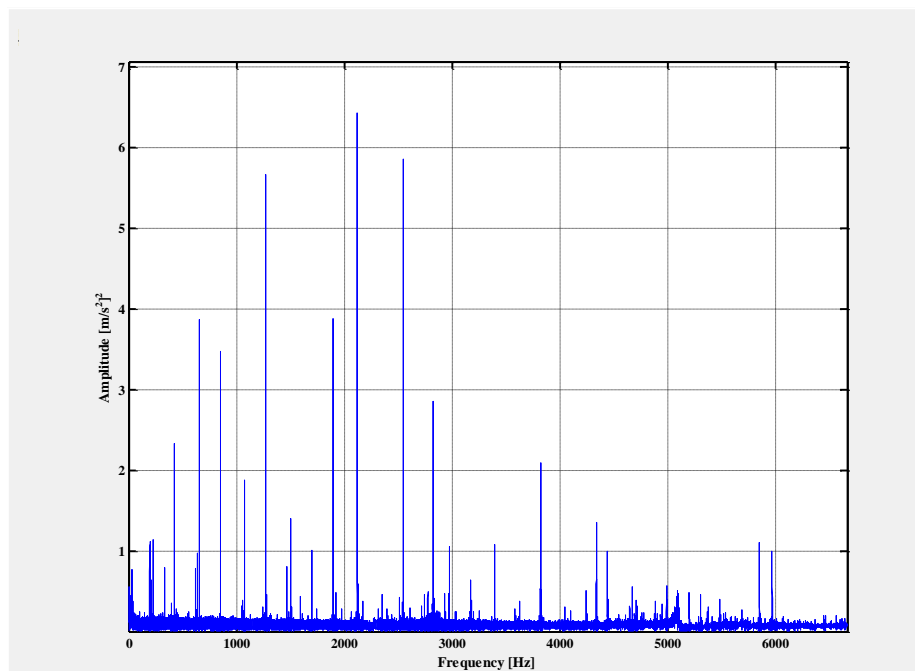


Figura 4.7 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S18-A).

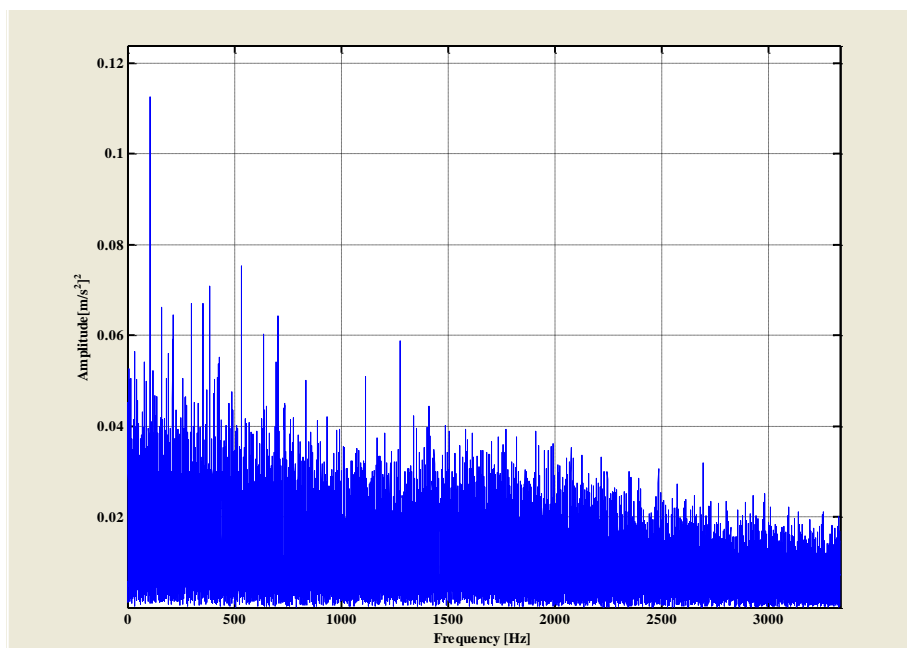


Figura 4.8 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 12, canale S04-A).

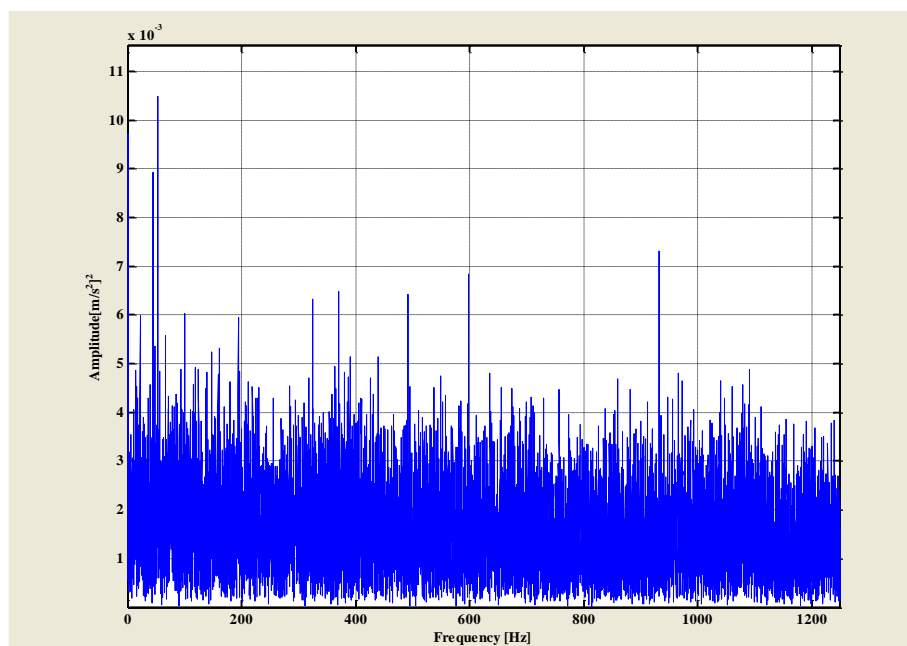


Figura 4.9 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S05-AD).

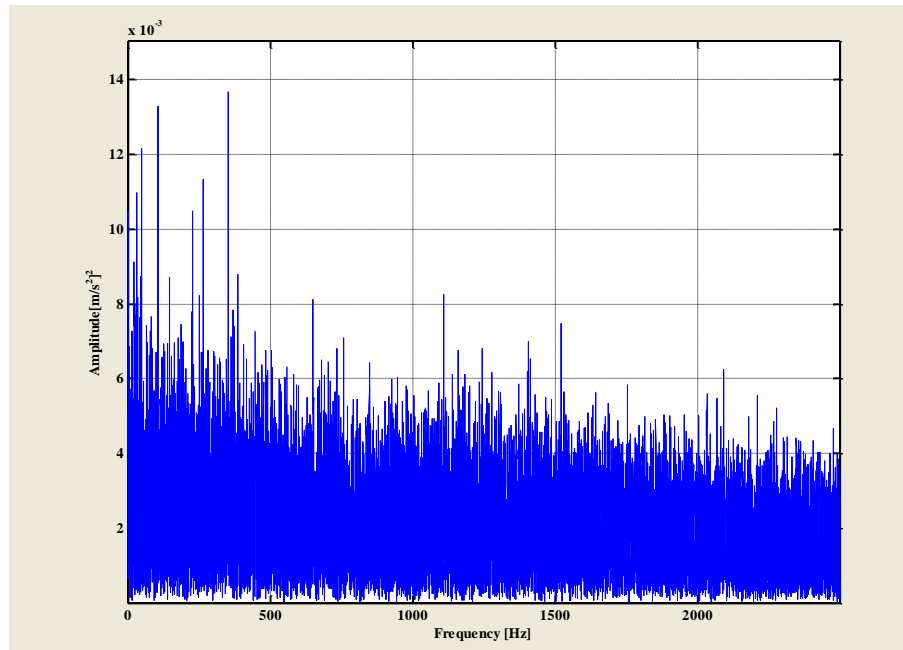


Figura 4.10 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S27-AT1).

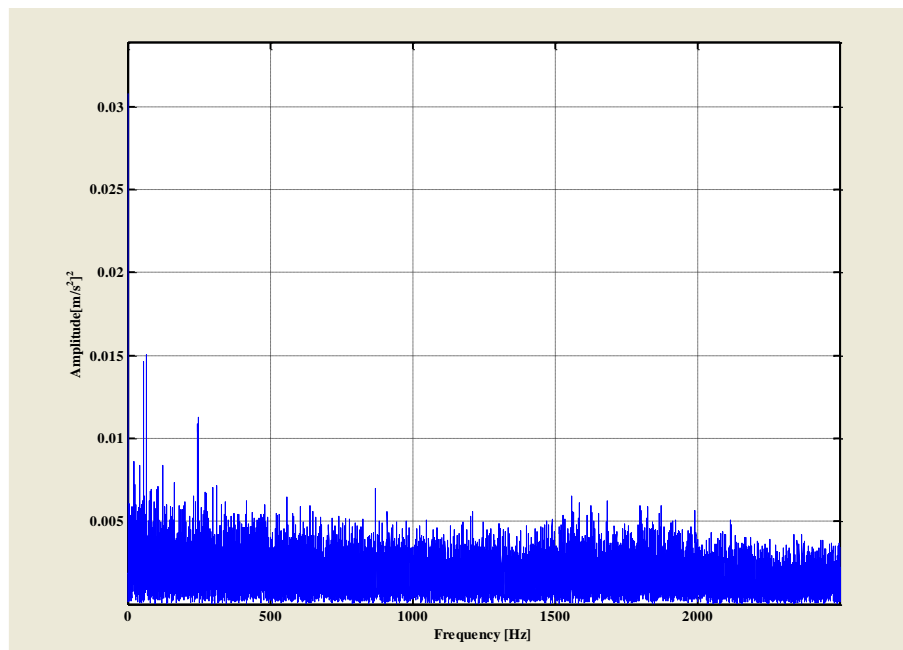


Figura 4.11 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 04, canale S28-AT3).

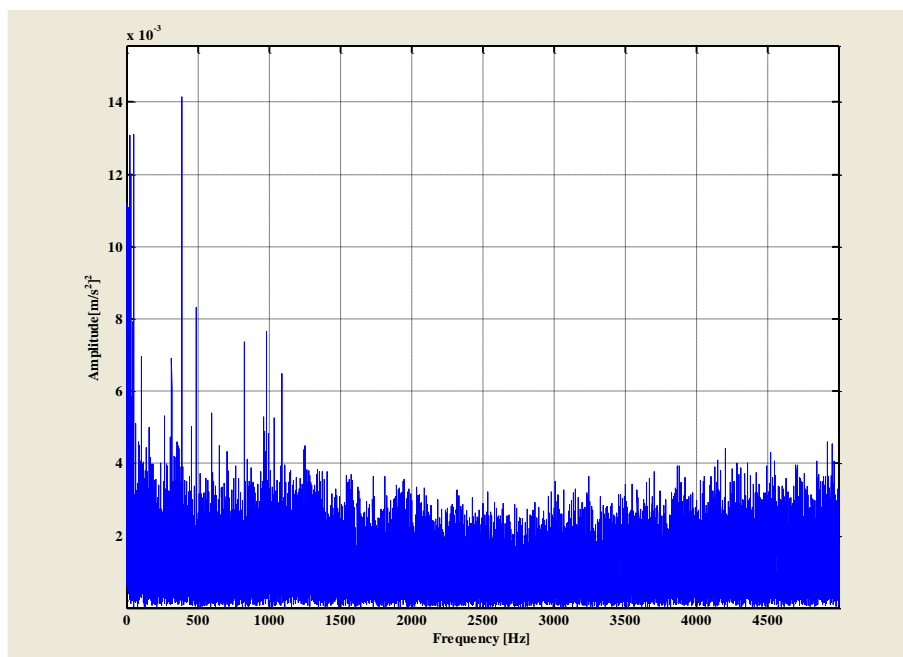


Figura 4.12 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S29-AT2).

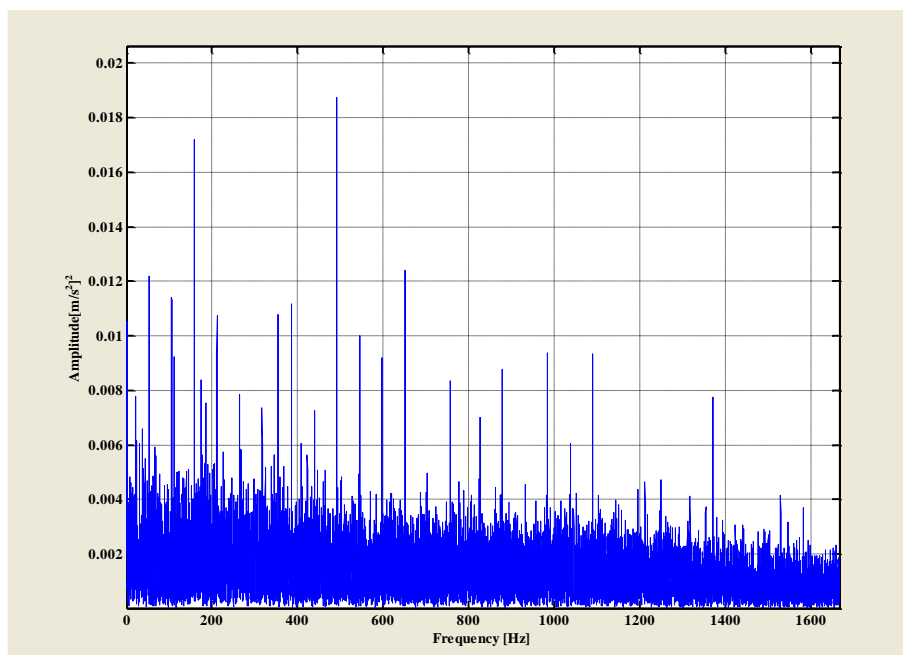


Figura 4.13 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 00 - T 01, canale S29-AT3).

#### 4.1.2. Difetto sull'anello interno: TST 02

In questo test il cuscinetto in posizione GP1 ha un difetto sull'anello interno (vedi tabelle 3.7 e 3.10).

Il danneggiamento è chiaramente diagnosticabile sia a bassa che ad alta velocità (vedi figure 4.14, 4.15, 4.16); inoltre nei segnali è spesso presente la traccia delle frequenze di rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore.

Il picco in frequenza corrispondente alla BPFI presenta *sidebands* spaziate della frequenza di rotazione del motore (vedi figura 4.14).

Inoltre il danneggiamento è diagnosticabile anche nel test in transitorio (vedi figura 4.15), ma meno chiaramente rispetto ai test a velocità costante.

Il canale che restituisce i risultati migliori è S05-AD proveniente da un accelerometro posto in prossimità del cuscinetto; buoni risultati sono forniti anche da uno degli accelerometri triassiali posto sulla cassa della trasmissione.

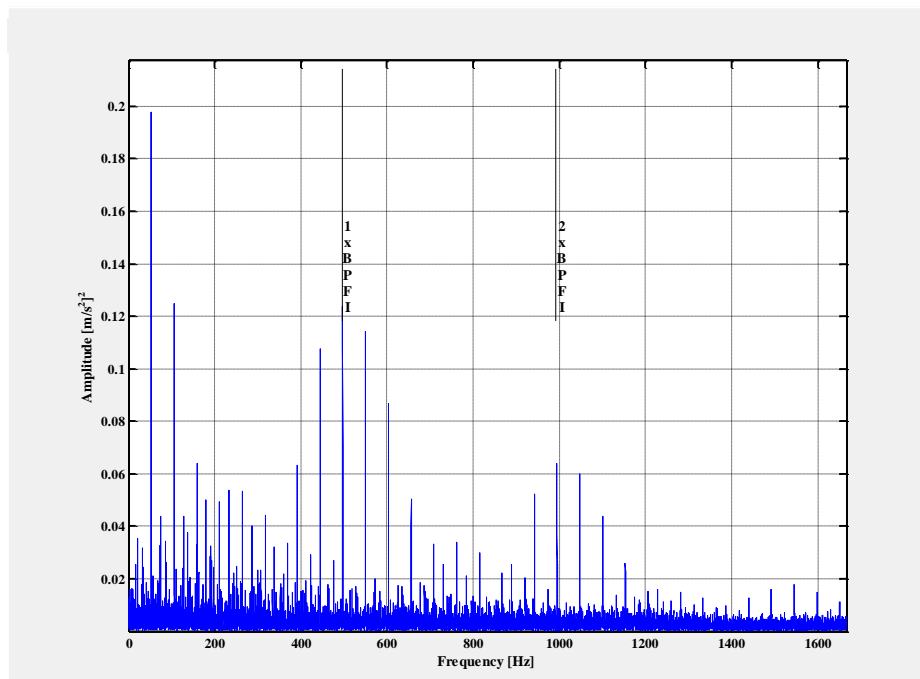


Figura 4.14 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 01, canale S29-AT3).

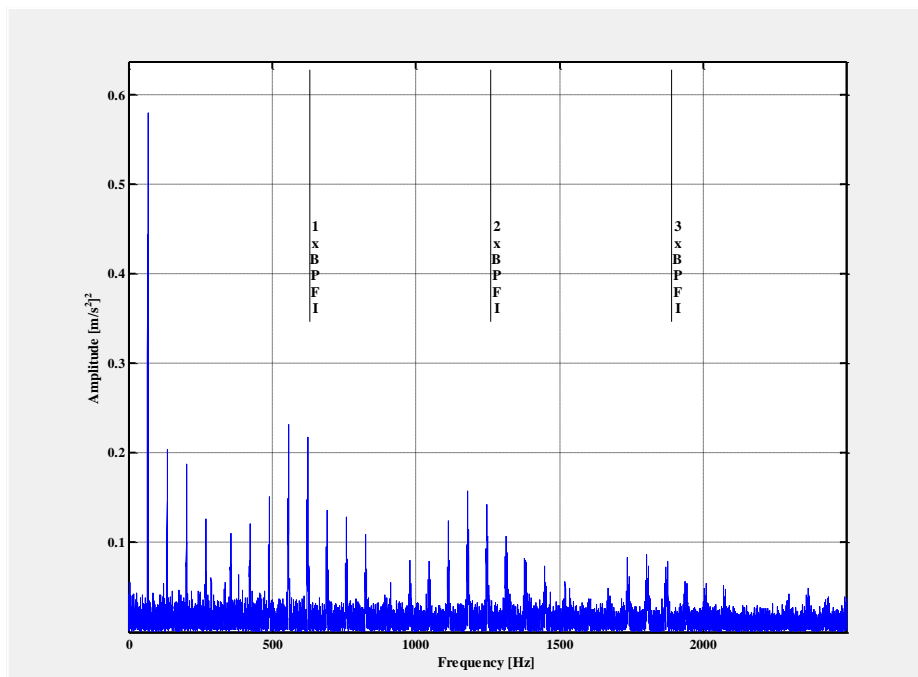


Figura 4.15 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 04, canale S05-AD).

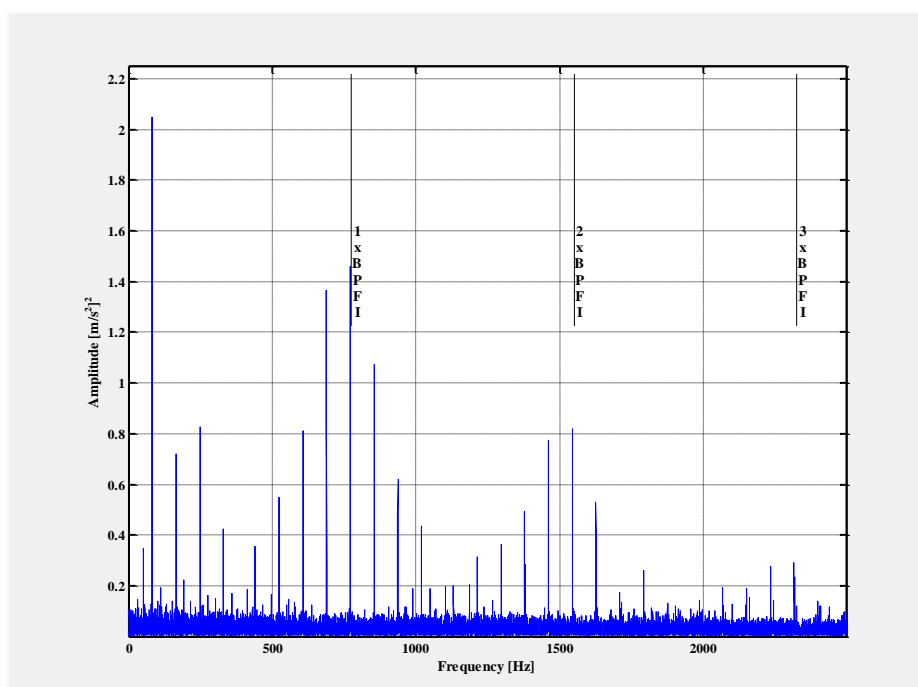


Figura 4.16 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 02 - T 05, canale S05-AD).

### 4.1.3. Difetto su di un elemento volvente: TST 04

Il cuscinetto in posizione GP1 presenta un difetto sull'elemento volvente (vedi tabelle 3.7 e 3.10).

Il danneggiamento è diagnosticabile solo nei test 01 e 12 (bassa velocità) sui canali provenienti dagli accelerometri triassiali posizionati sulla cassa della trasmissione e comunque non chiaramente.

Nei test ad alta velocità e in transitorio il difetto non è visibile.

Inoltre negli spettri sono presenti le frequenze di rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore e, in alcuni casi, anche la frequenza di rotazione della gabbia del cuscinetto (vedi figure 4.17 e 4.18).

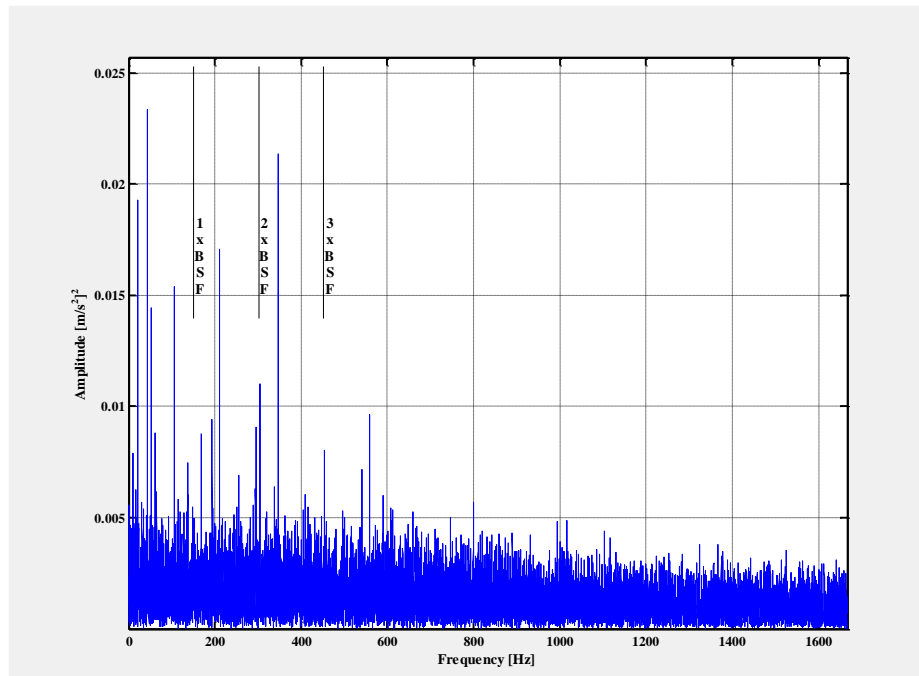


Figura 4.17 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 04 - T 01, canale S27-AT1).

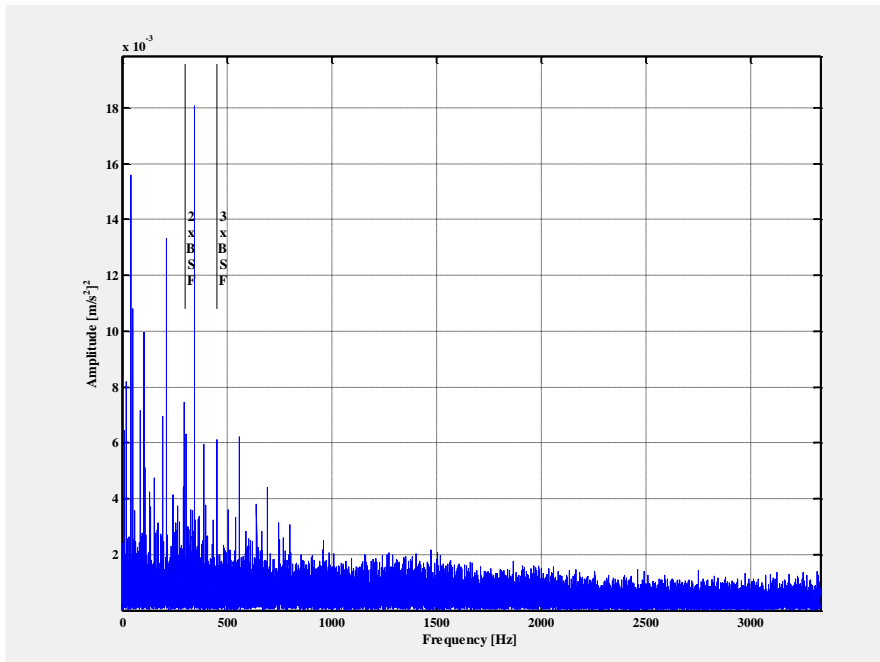


Figura 4.18 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 04 - T 01, canale S29-AT2).

#### 4.1.4. Difetto dovuto ad un aumento del gioco assiale: TST 07

Il cuscinetto in posizione GP1 presenta un difetto (*axial clearance*) dovuto ad aumento del gioco assiale (vedi tabelle 3.7 e 3.10).

Sono state ricercate tutte le frequenze caratteristiche dei possibili danneggiamenti (BPFO, BPFI, BSF, FTF) ma non sono state riscontrate in nessun segnale proveniente dagli accelerometri. Questo può essere dovuto al fatto che il difetto, non essendo localizzato, non genera frequenze riconducibili a quelle caratteristiche (vedi paragrafo 3.5).

Negli spettri, inoltre, è comunque possibile individuare le frequenze di rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore (vedi figure 4.19 e 4.21).

Alcuni segnali risultano molto rumorosi (vedi figura 4.20).



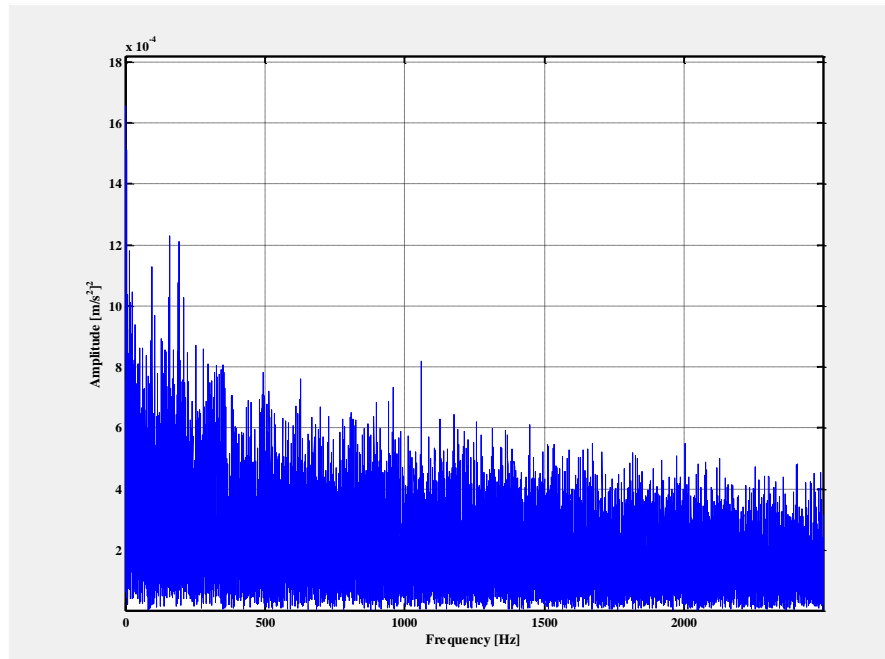


Figura 4.19 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 01, canale S29-AT2).

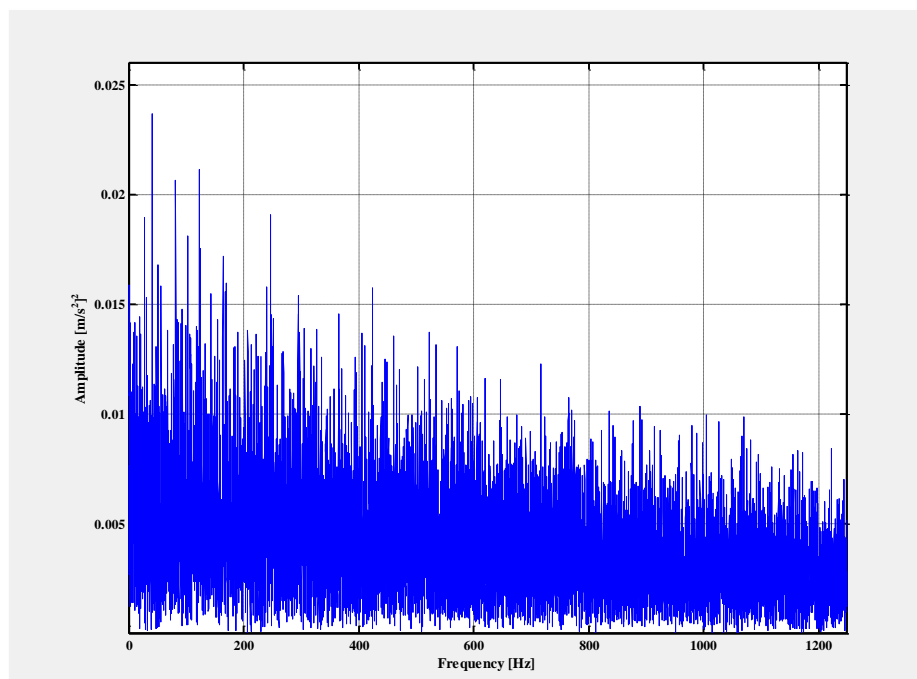


Figura 4.20 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 04, canale S27-AT2).

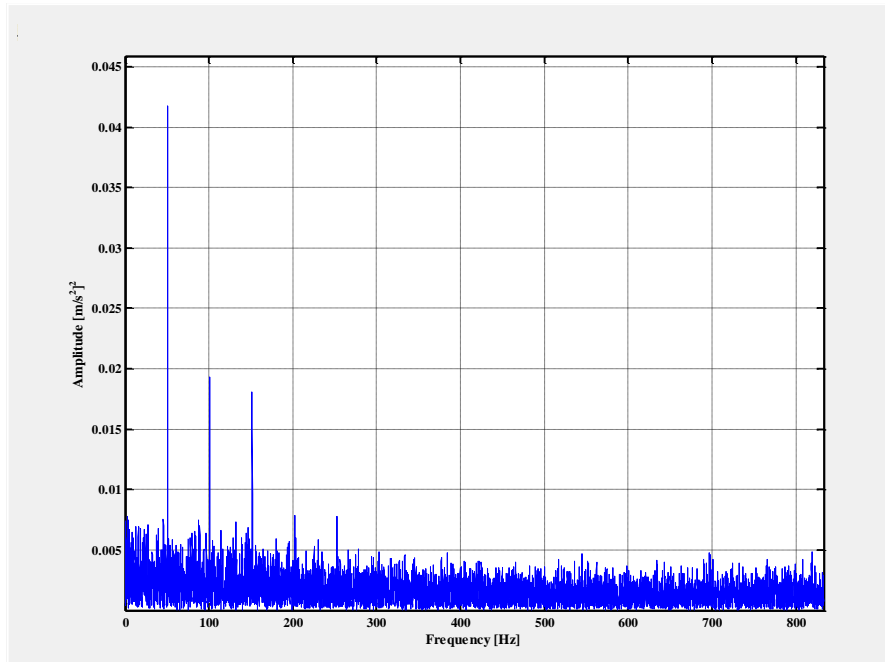


Figura 4.21 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 07 - T 05, canale S29-AT2).

#### 4.1.5. Difetto dovuto ad ossidazione di tutti gli elementi: TST 08

Il cuscinetto in posizione GP1 presenta un difetto dovuto all'ossidazione di tutti gli elementi (vedi tabelle 3.7 e 3.10).

Nei test non tutte le frequenze corrispondenti ai difetti sugli elementi del cuscinetto sono visibili: in particolare, nei test positivi, è sempre presente la BPFO e, in qualche caso, la BPF1 (vedi figure 4.22, 4.23 e 4.24).

Le frequenze FTF e BSF invece sono presenti solo in alcuni rari casi.

I picchi relativi alla BPFO e alla BPF1 non presentano *sidebands*.

Inoltre sono presenti anche le frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore, con ampiezza confrontabile rispetto a quella dei picchi relativi ai difetti.

Il canale che ha dato maggiori riscontri positivi è S04-A proveniente da un accelerometro posizionato in prossimità del cuscinetto danneggiato.

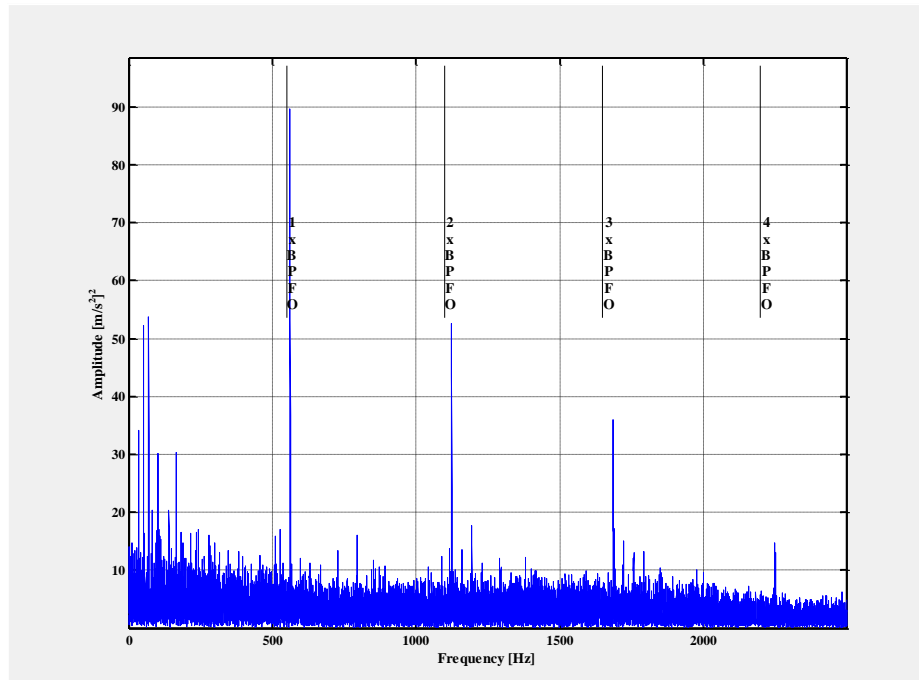


Figura 4.22 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 05, canale S04-A).

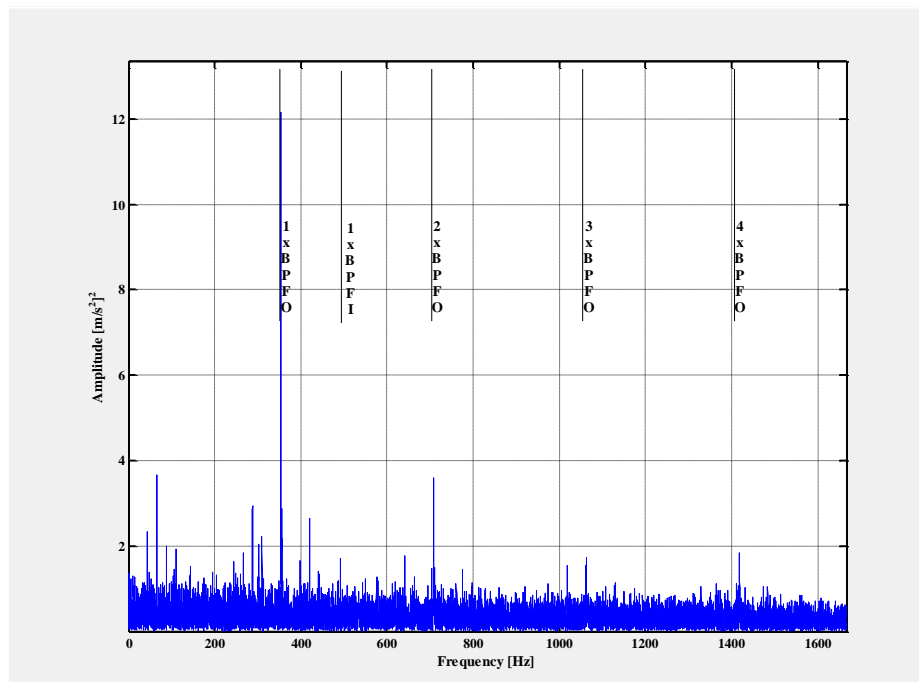


Figura 4.23 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 12, canale S04-A).

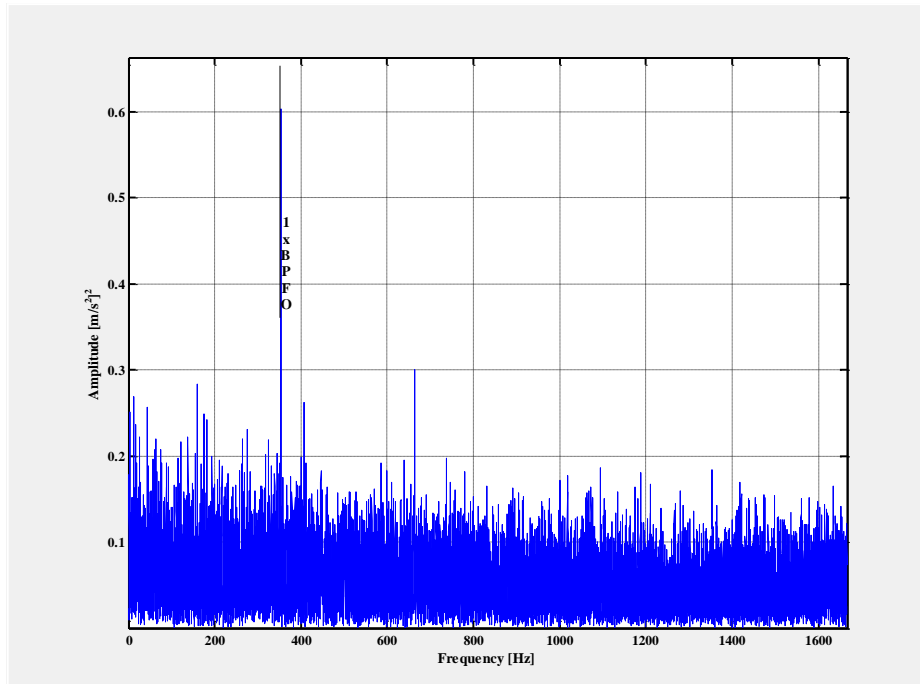


Figura 4.24 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 08 - T 12, canale S29-AT2).

#### 4.1.6. Difetto sull'elemento volvente: TST 12

Il cuscinetto in posizione GP2 presenta un difetto di piccole dimensioni sull'elemento volvente (vedi tabelle 3.7 e 3.11).

Il difetto è visibile, ma non chiaramente diagnosticabile, sia a bassa che ad alta velocità; in transitorio invece non è identificabile.

La causa può essere dovuta al fatto che il difetto è di dimensioni troppo contenute.

Gli spettri presentano preponderanza delle frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore (vedi figure 4.25 e 4.26).

La frequenza relativa al difetto e le sue armoniche superiori sono annegate nel fondo e non è possibile distinguerle con chiarezza.

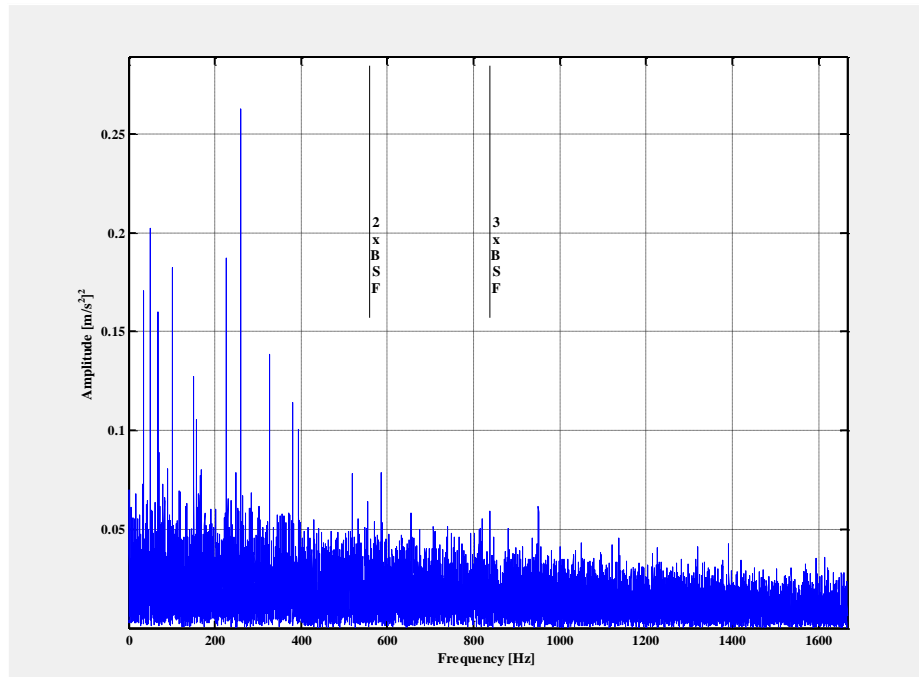


Figura 4.25 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 12 - T 05, canale S05-AD).

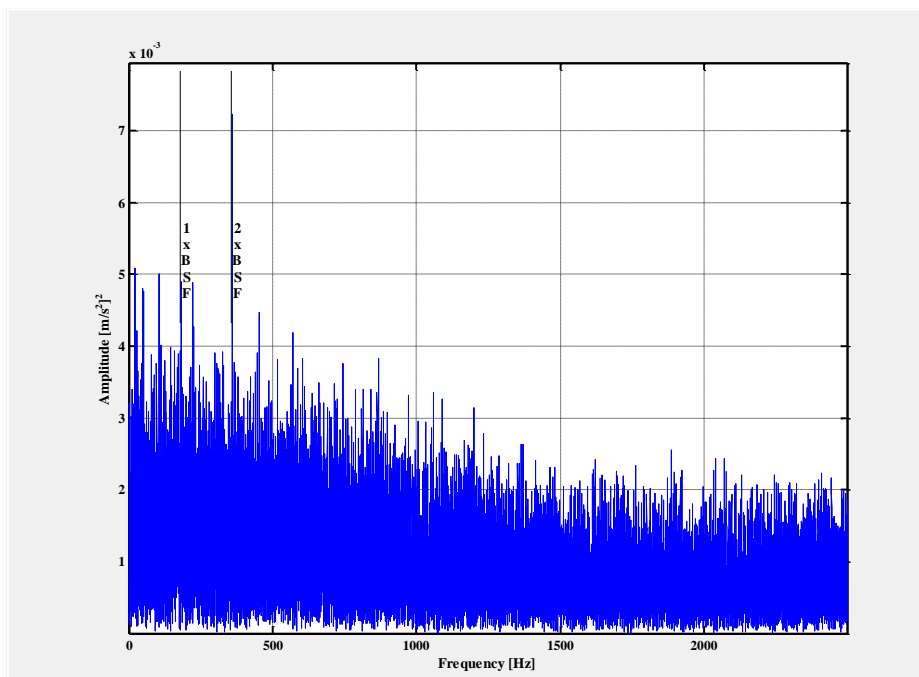


Figura 4.26 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 12 - T 12, canale S29-AT2).

#### 4.1.7. Difetto sull'elemento volvente: TST 13

Il cuscinetto in posizione GP2 presenta un difetto di medie dimensioni sull'elemento volvente (vedi tabella 3.11).

Questo fa sì che vengano eccitate maggiormente le frequenze caratteristiche diventando chiaramente visibili negli spettri ottenuti sia dagli accelerometri triassiali posti sulla cassa sia dai monoassiali posti in prossimità del cuscinetto danneggiato (vedi figure 4.27, 4.28 e 4.29).

Sono presenti anche le frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore con ampiezza comparabile a quelle del difetto.

In alcuni casi compaiono anche le frequenze relative alla rotazione della gabbia con ampiezza ridotta rispetto alle altre frequenze.

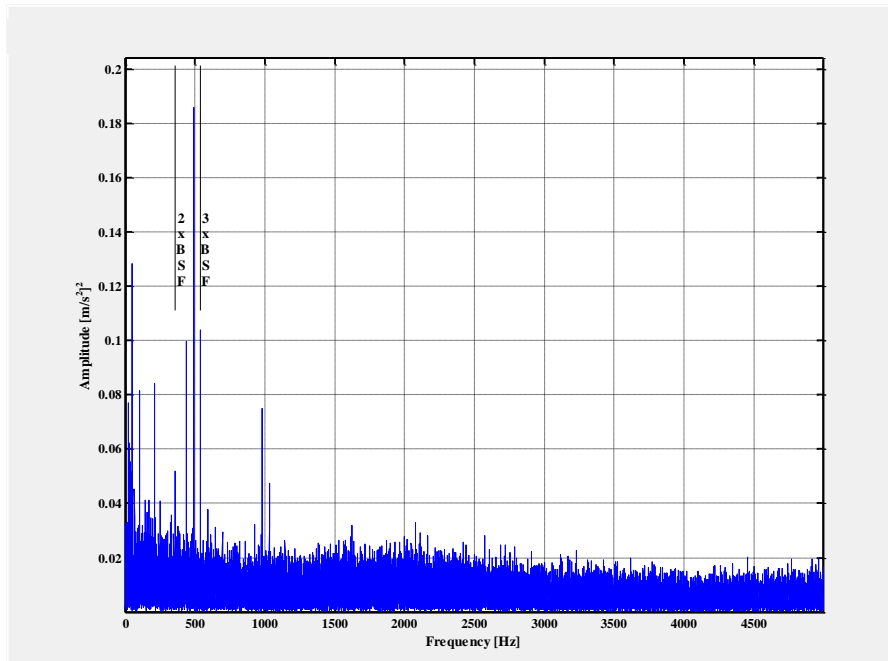


Figura 4.27 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 01, canale S05-AD).

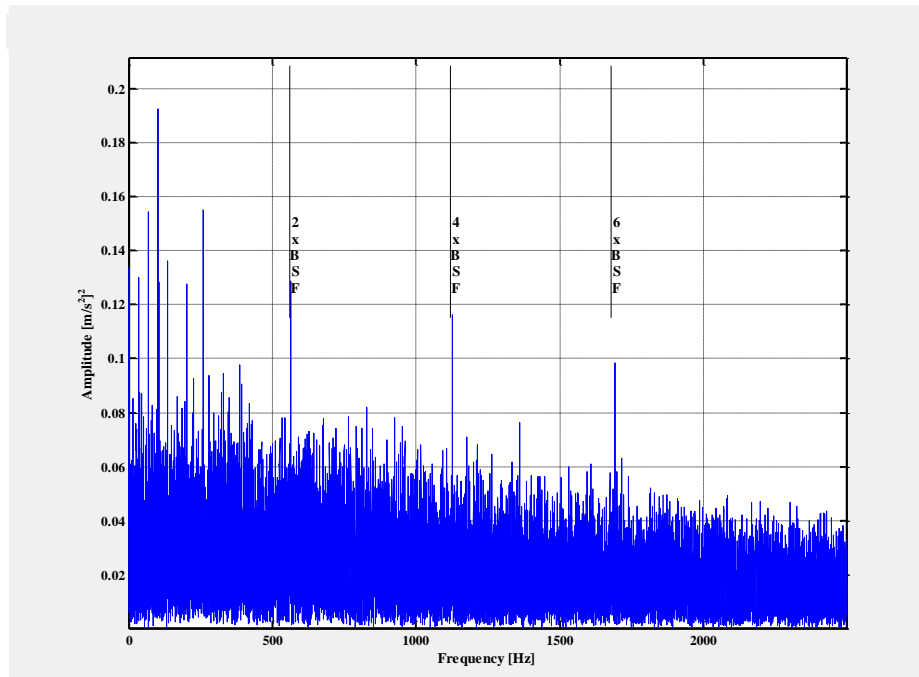


Figura 4.28 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 05, canale S04-A).

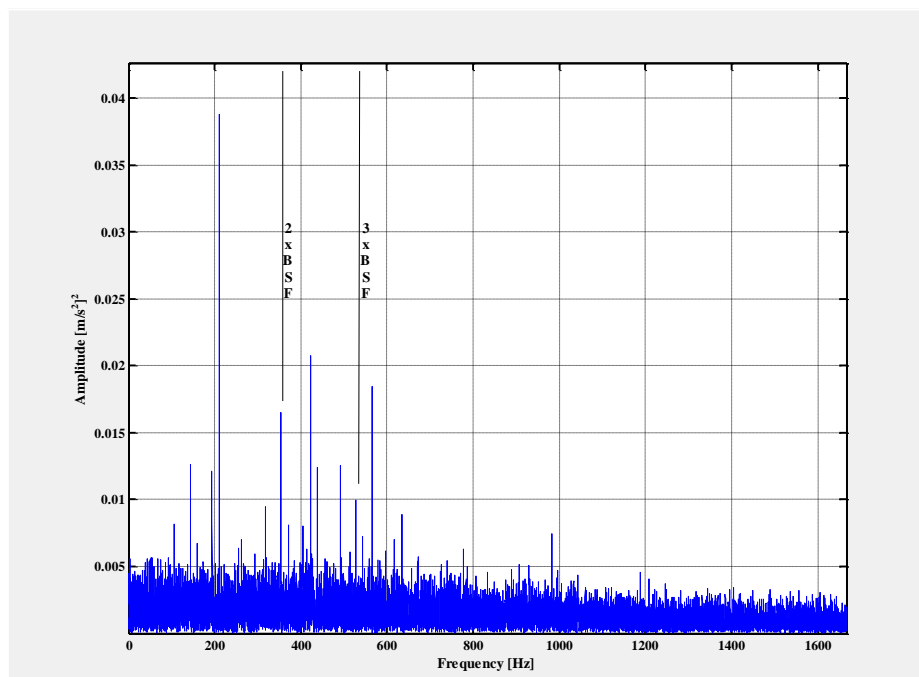


Figura 4.29 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 13 - T 12, canale S29-AT2).

#### 4.1.8. Difetto sulla gabbia: TST 14

Il cuscinetto in posizione GP3 presente un difetto sulla gabbia (vedi tabelle 3.7 e 3.11).

Il danneggiamento è chiaramente diagnosticabile solo nel test ad alta velocità (vedi figure 4.30 e 4.31).

Inoltre negli spettri sono sempre presenti le frequenze di rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore con ampiezze predominanti.

I canali che forniscono risultati migliori sono S04-A e S05-AD che provengono da accelerometri monoassiali posti sulla cassa della trasmissione.

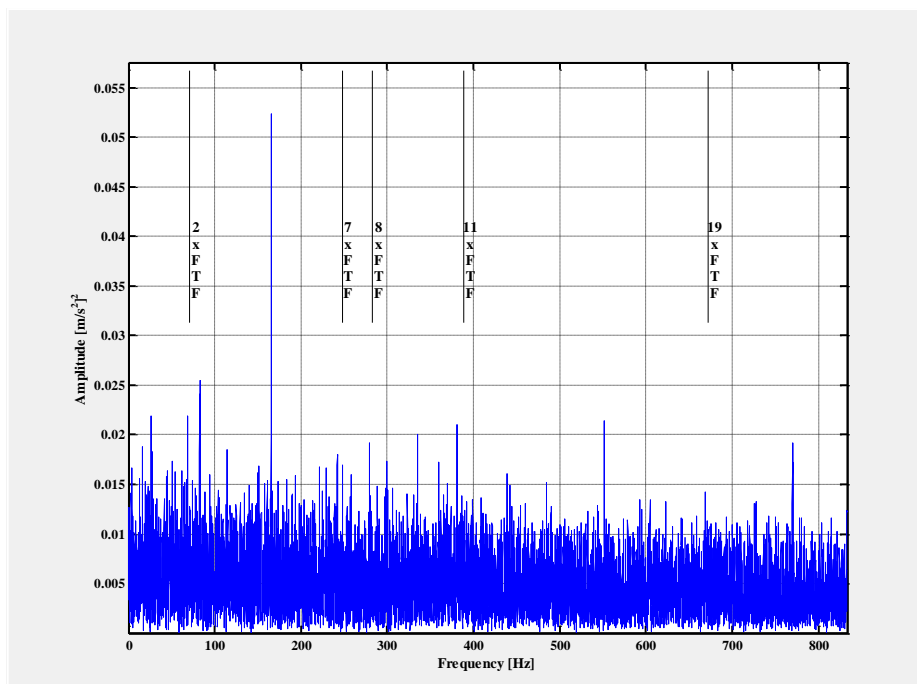


Figura 4.30 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 14 - T 05, canale S04-A).



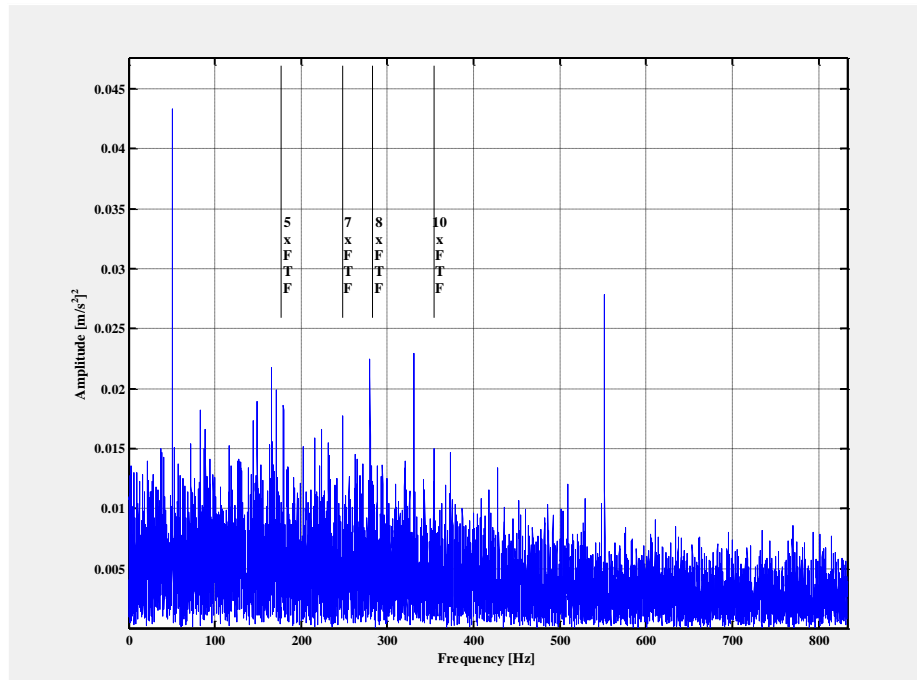


Figura 4.31 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 14 - T 05, canale S05-AD).

#### 4.1.9. Difetto sull'anello interno: TST 16

Il cuscinetto in posizione GP3 presenta un difetto da scheggiatura sull'anello interno (vedi tabelle 3.7 e 3.11).

Il difetto è chiaramente diagnosticabile solo a bassa velocità (vedi figura 4.32); in transitorio invece il difetto è meno diagnosticabile ma comunque visibile (vedi figura 4.33).

Sono presenti anche le frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore.

Inoltre, nel test a bassa velocità, i picchi relativi alle frequenze relative al danneggiamento presentano *sidebands* spaziate della frequenza di rotazione del motore. Questa caratteristica non si ripresenta nel transitorio.

Il difetto è visibile negli spettri ottenuti da segnali provenienti sia dagli accelerometri monoassiali che da quelli triassiali posti sulla cassa della trasmissione.

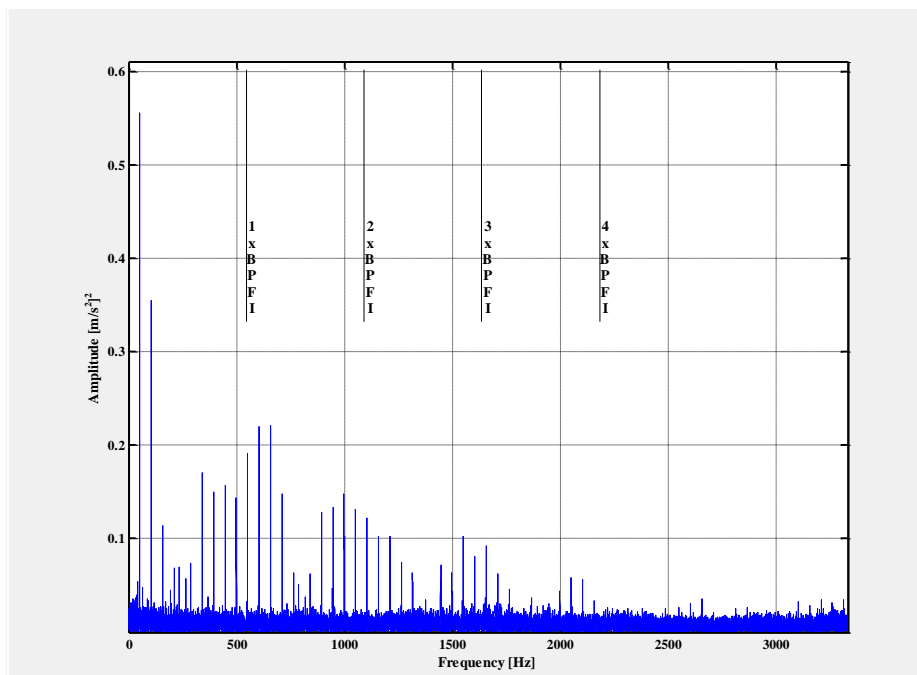


Figura 4.32 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 16 - T 01, canale S05-AD).

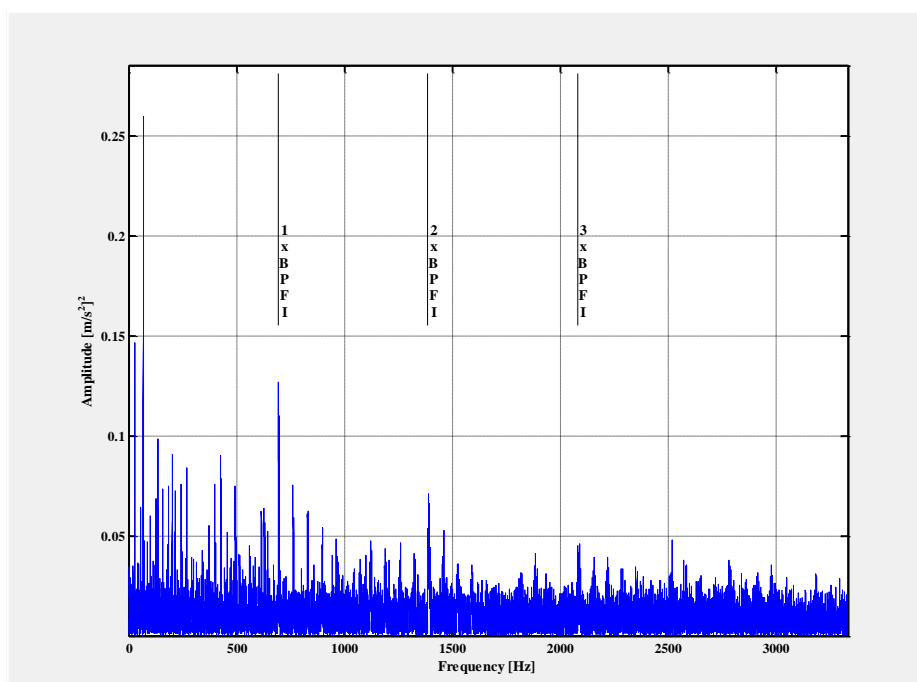


Figura 4.33 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 16 - T 04, canale S28-AT3).

#### 4.1.10. Difetto sull'anello interno: TST 25

Il cuscinetto in posizione MP1 presenta un difetto sull'anello interno in posizione centrale (vedi tabelle 3.7 e 3.8).

Essendo un cuscinetto a rulli e a causa della posizione centrale del difetto sulla pista, la frequenza caratteristica viene scarsamente eccitata: infatti solo in alcuni casi (vedi figure 4.34 e 4.35) risulta visibile ma non chiaramente diagnosticabile in nessuno dei canali degli accelerometri posti sul motore.

Inoltre sono sempre presenti le frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore con ampiezze predominanti rispetto alle frequenze del difetto.

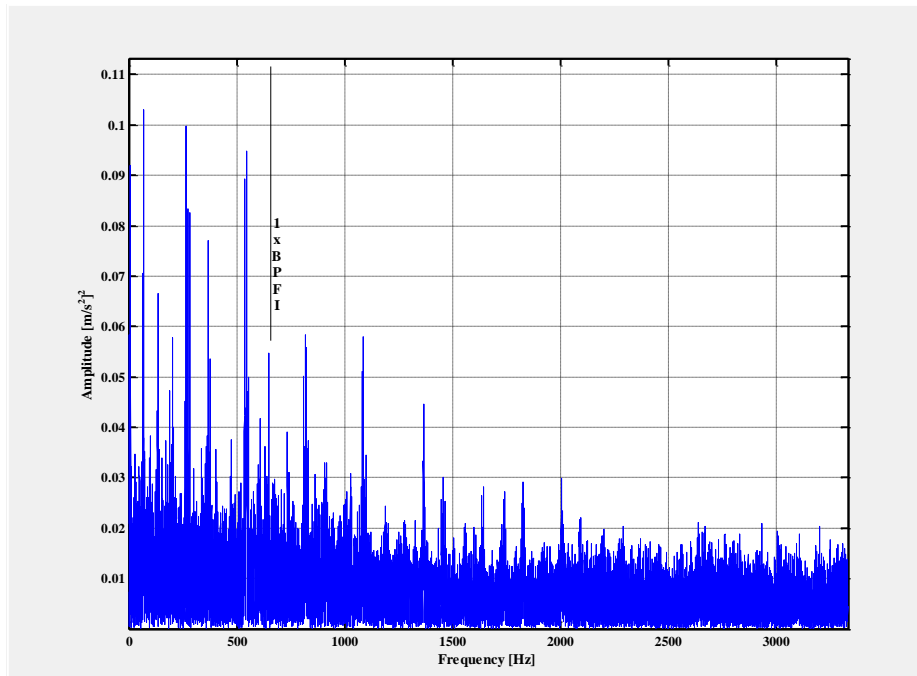


Figura 4.34 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 25 - T 04, canale S17-A).

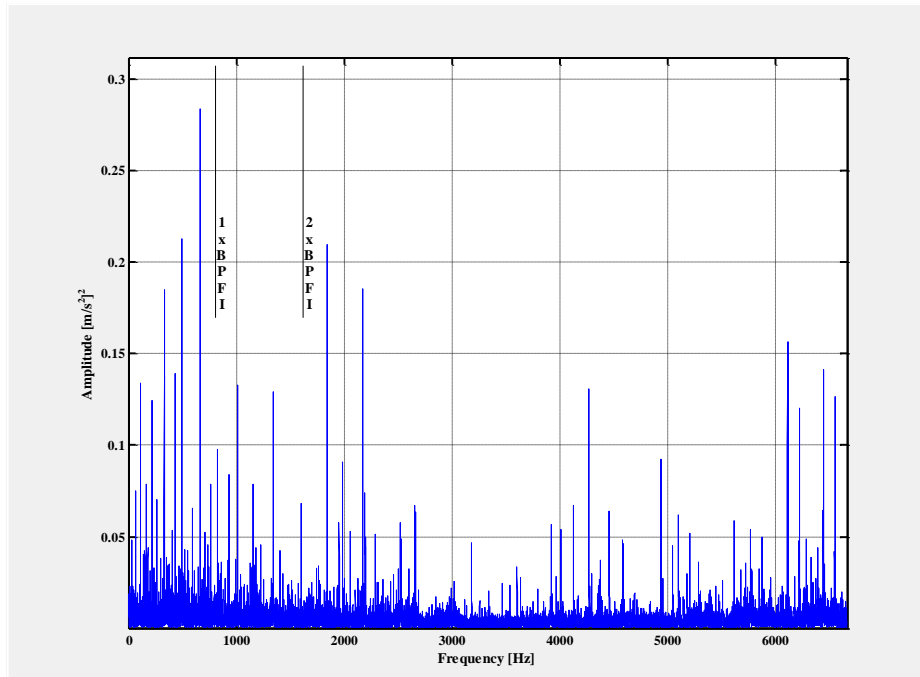


Figura 4.35 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 25 - T 05, canale S26-AT1).

#### 4.1.11. Difetto sull'anello esterno: TST 26

Il cuscinetto in posizione MP1 presenta un difetto sull'anello esterno in posizione centrale (vedi tabelle 3.7 e 3.8).

Come nel test precedente, la frequenza caratteristica viene scarsamente eccitata: infatti solo in alcuni casi (vedi figure 4.36 e 4.37) risulta visibile ma non chiaramente diagnosticabile nonostante la presenza di molte sue armoniche superiori; solo ad alta velocità le frequenze hanno ampiezze predominanti rispetto alle altre componenti in frequenza presenti nello spettro.

Inoltre sono sempre presenti le frequenze relative alla rotazione del motore REGINA e dell'utilizzatore con ampiezze predominanti rispetto alle frequenze del difetto.

I segnali che permettono la migliore diagnostica provengono dagli accelerometri triassiali posti sulla cassa del motore.

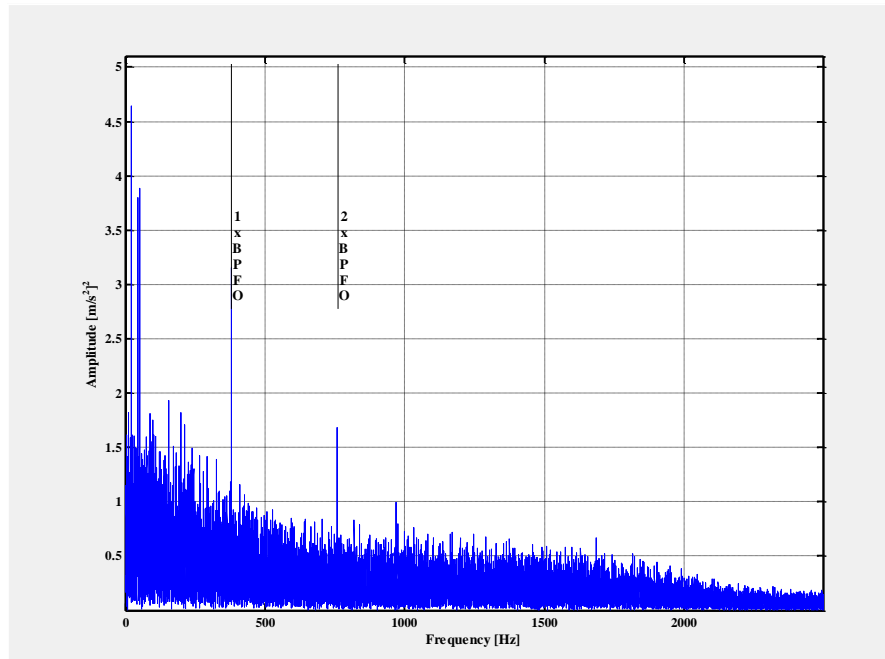


Figura 4.36 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 26 - T 12, canale S17-A).

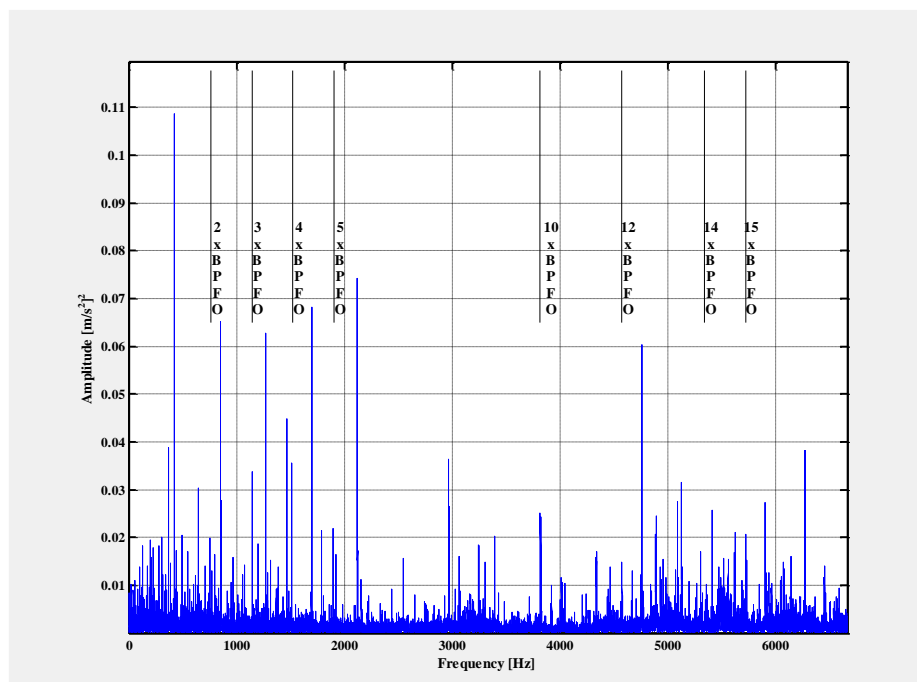


Figura 4.37 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 26 - T 12, canale S26-AT1).

#### 4.1.12. Difetto sull'anello esterno: TST 32

Il cuscinetto in posizione MP1 presenta un difetto da scheggiatura di piccole dimensioni sull'anello esterno (vedi tabelle 3.7 e 3.8).

Il danneggiamento è visibile solo a bassa velocità dove sono presenti anche la armoniche di rotazione del motore REGINA con ampiezze maggiori rispetto alle armoniche del difetto, sia per i segnali provenienti dagli accelerometri triassiali che per quelli provenienti dagli accelerometri monoassiali, entrambi posti sulla cassa del motore (vedi figure 4.38 e 4.39).

I test ad alta velocità e in transitorio non hanno dato esiti positivi.

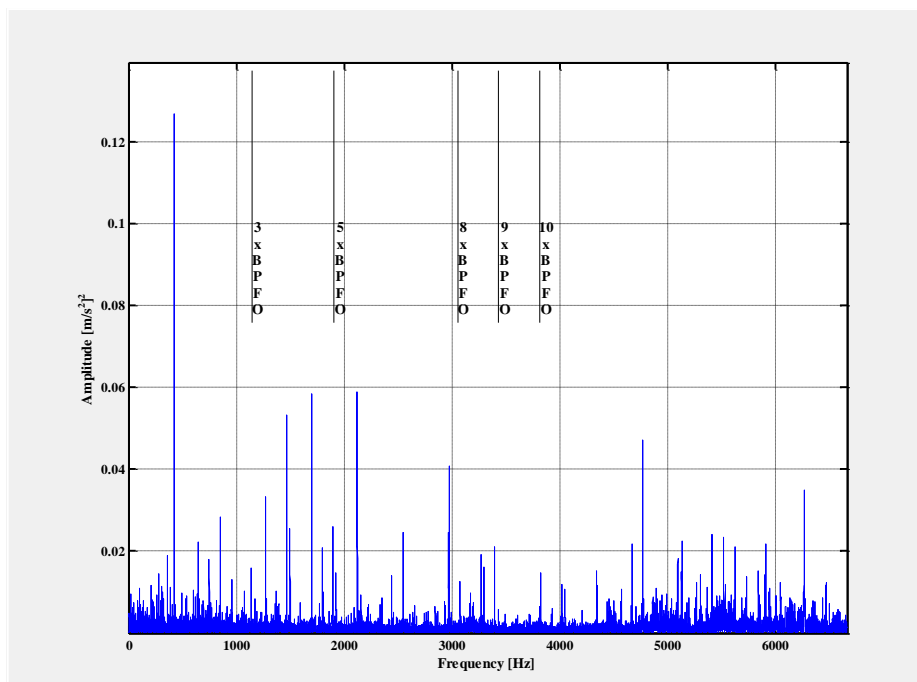


Figura 4.38 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 32 - T 01, canale S26-AT1).

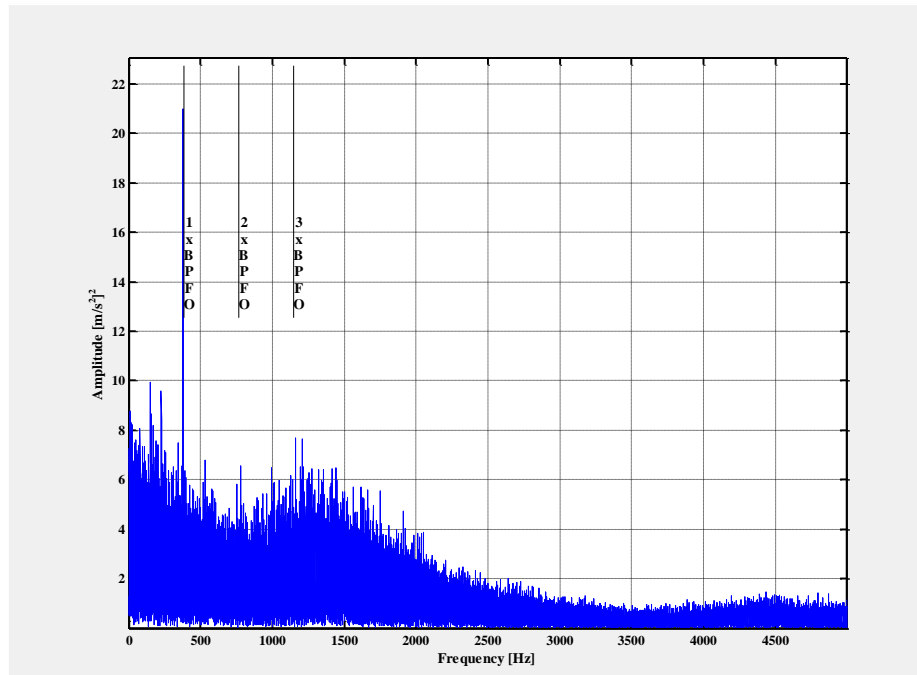


Figura 4.39 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 32 - T 12, canale S18-A).

#### 4.1.13. Difetto sull'anello esterno: TST 35

Il cuscinetto in posizione MP1 presenta un difetto da scheggiatura di medie dimensioni sull'anello esterno (vedi tabelle 3.7 e 3.8).

Questo test è simile al TST 32, ma a differenza di quest'ultimo il difetto ora ha dimensioni tali da eccitare maggiormente la frequenza caratteristica, anche ad alta velocità (vedi figura 4.40).

La BPFO e le sue armoniche successive hanno ampiezze predominanti sulle frequenze relative al motore REGINA e all'utilizzatore.

Inoltre sono spesso presenti fino a quattro armoniche superiori della frequenza del difetto con ampiezze decrescenti (vedi figure 4.40 e 4.41).

L'accelerometro posto in prossimità del cuscinetto danneggiato fornisce i risultati migliori in termini diagnostici.

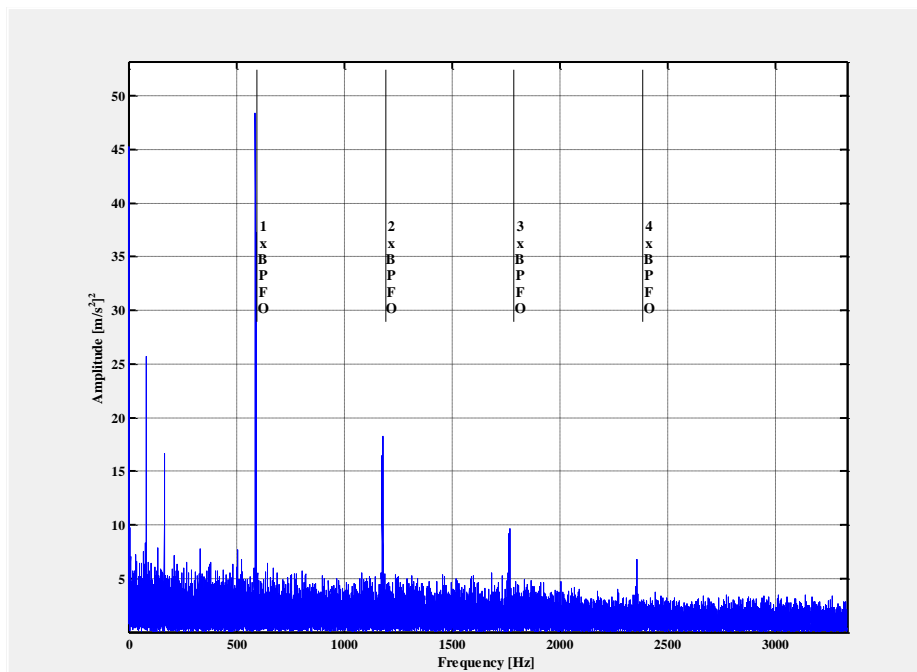


Figura 4.40 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 35 - T 05, canale S24-A).

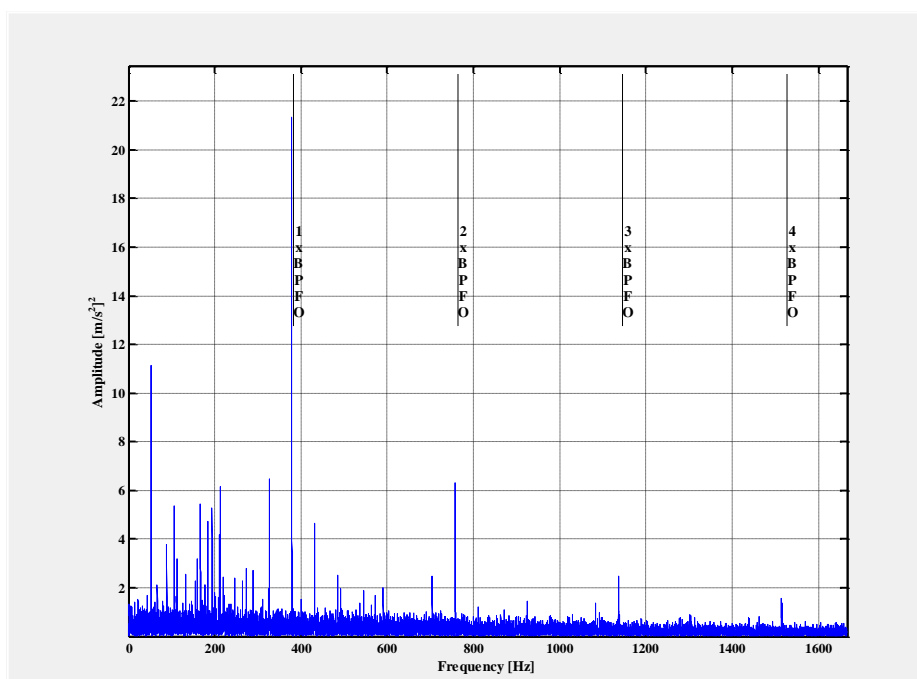


Figura 4.41 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 35 - T 12, canale S24-A).



#### 4.1.14. Difetto sull'elemento volvente: TST 36

Il cuscinetto in posizione MP2 presenta un difetto sull'elemento volvente (vedi tabelle 3.7 e 3.9).

Il danneggiamento eccita chiaramente la frequenza caratteristica e le sue armoniche superiori sia nei test a bassa velocità che in transitorio, sia nei segnali provenienti dagli accelerometri monoassiali che dagli accelerometri triassiali (vedi figure 4.42, 4.43 e 4.44).

Le ampiezze dei picchi relativi al difetto sono rilevanti e chiaramente diagnosticabili.

In alcuni test sono presenti anche le frequenze relative alla rotazione della gabbia del cuscinetto.

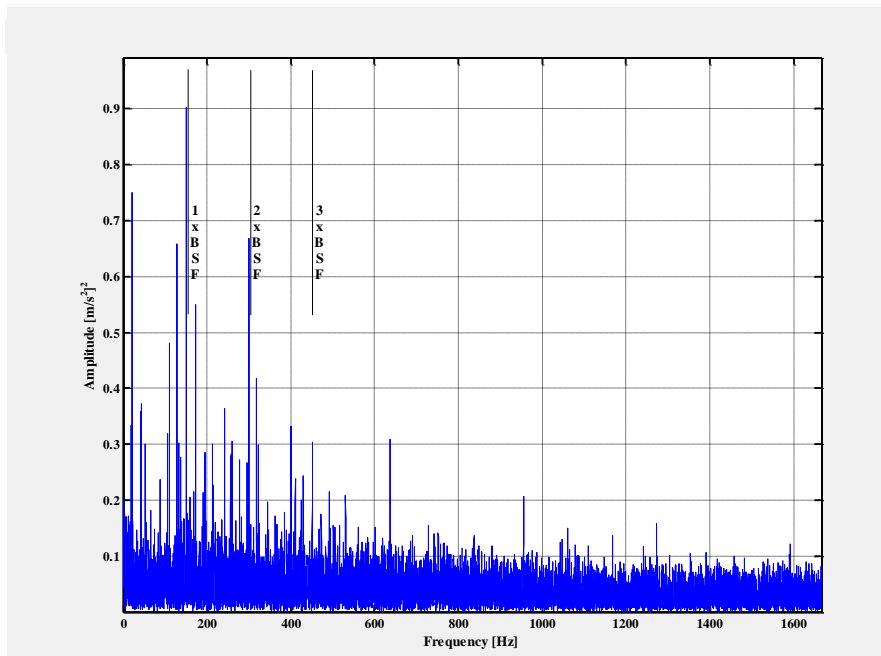


Figura 4.42 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 - T 01, canale S23-A).

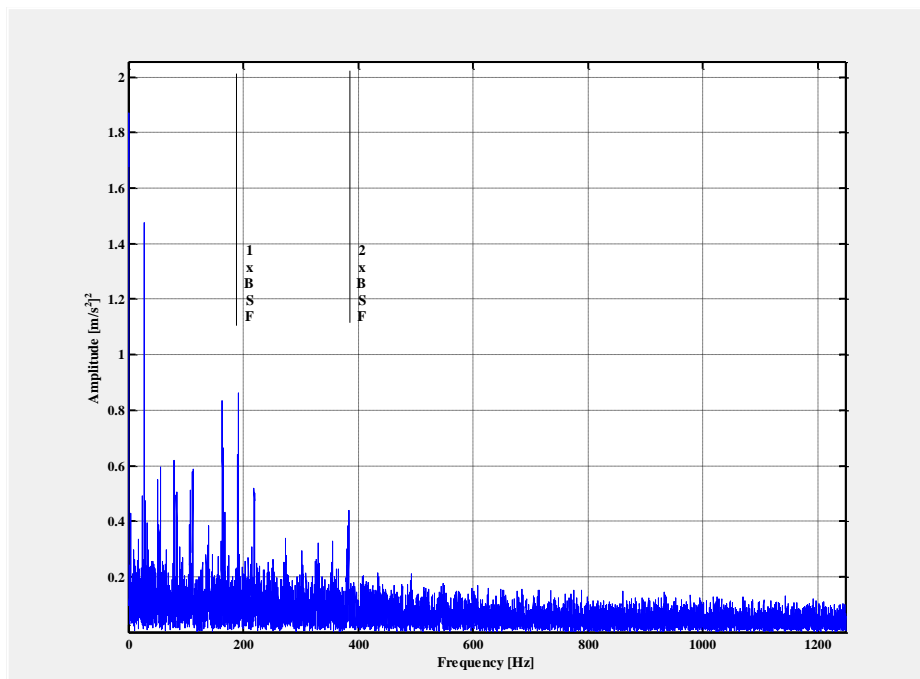


Figura 4.43 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 T 04, canale S26-AT1).

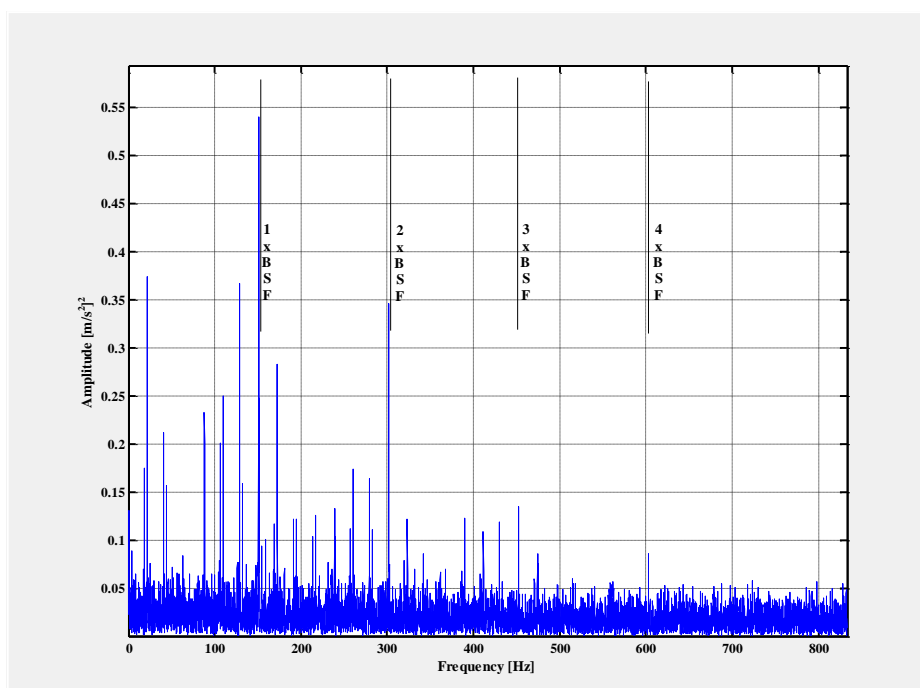


Figura 4.44 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 36 - T 12, canale S23-A).

#### 4.1.15. Difetto sull'anello interno: TST 38

Il cuscinetto in posizione MP2 presenta un difetto da scheggiatura sull'anello interno (vedi tabelle 3.7 e 3.9).

Il danneggiamento eccita visibilmente la frequenza caratteristica e le sue armoniche superiori sia nei test a bassa velocità che in quelli ad alta velocità (vedi figure 4.45 e 4.46), mentre in transitorio non sono visibili.

Le ampiezze dei picchi relativi al difetto sono rilevanti e chiaramente diagnosticabili, soprattutto nei segnali provenienti dagli accelerometri monoassiali.

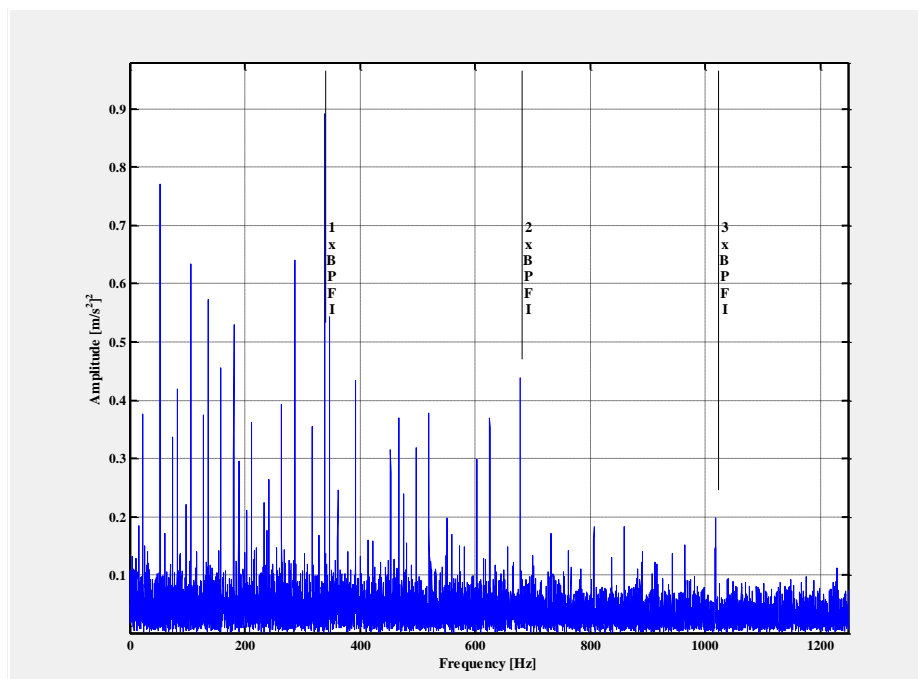


Figura 4.45 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 38 - T 01, canale S23-A).

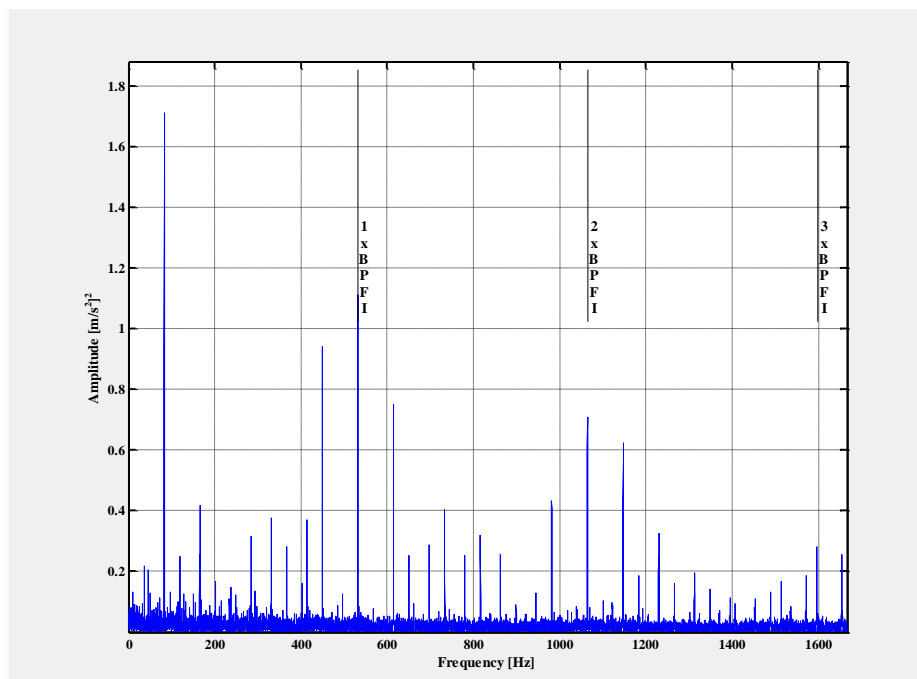


Figura 4.46 Spettro SK del segnale di vibrazione (TST 38 - T 05, canale S23-A).

#### 4.1.16. Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di vibrazione

La *Spectral Kurtosis* permette di individuare correttamente il difetto sulla pista interna dei cuscinetti: nella maggior parte dei casi è possibile individuare le frequenze caratteristiche dei difetti introdotti. Solo in tre casi questo non è stato possibile: nei TST 07, 11 e 29.

Nel TST 07 viene ammesso un aumento del gioco assiale del cuscinetto: in questo caso sono state ricercate tutte le frequenze caratteristiche in quanto a priori non si conosce quale frequenza sarebbe stata eccitata da un difetto simile. Non è stata rintracciata alcuna frequenza caratteristica in quanto, essendo il difetto non localizzato ma distribuito sull'intera lunghezza della pista, probabilmente esse non vengono eccitate. Nei TST 11 e 29 viene simulato un difetto di piccole dimensioni al centro della pista. E' possibile che il rullo, durante la rotazione del cuscinetto, scarichi gran parte del carico sui bordi della pista e non al centro non riuscendo quindi ad eccitare la frequenza caratteristica del difetto. In questo caso, infatti, risulta assente negli spettri dei segnali di vibrazione.

Il difetto sulla pista esterna viene anch'esso individuato mediante l'uso di questa tecnica: vengono identificate le frequenze caratteristiche in tutti i test tranne che nel TST 30, dove, similmente ai TST 11 e 29 precedenti, il difetto viene realizzato al centro della pista esterna del cuscinetto. Per gli stessi motivi esposti precedentemente la frequenza caratteristica del difetto potrebbe non essere eccitata.

L'identificazione dei difetti sugli elementi volventi deve essere discussa separando due casi: il primo riguardante i cuscinetti a sfere, il secondo quelli a rulli. Nel primo caso il difetto è sempre visibile negli spettri dei segnali; preme sottolineare che, nonostante siano presenti, le frequenze caratteristiche non sono ben evidenti all'interno degli spettri, al contrario degli altri tipi di danneggiamenti analizzati. Nel secondo caso il difetto risulta essere di difficile diagnosi a causa della ridotta ampiezza delle frequenze di vibrazione caratteristiche: questo perché in tutti i test è stato simulato un difetto di dimensioni variabili al centro del rullo e mai sul bordo. Si può affermare che le dimensioni maggiori del difetto non lo rendono maggiormente visibile a livello di spettro in frequenza.

Il difetto sulla gabbia dei cuscinetti è sempre visibile in tutti i test analizzati; occorre però sottolineare che la frequenza caratteristica della gabbia è presente anche in alcuni test che non prevedono un difetto sulla stessa: questo fenomeno rende impossibile la diagnostica del difetto in quanto se in questa attività si conosce a priori il tipo di difetto, non altrettanto si può dire in una eventuale applicazione industriale nell'ambito della quale si rischia di fermare la macchina a causa di un difetto inesistente erroneamente diagnosticato.

In conclusione la configurazione di test che ha dato i peggiori risultati diagnostici è stata quella eseguita in transitorio (T04).

Tabella 4.1 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di vibrazione.

TST	Frequenza ricercata	T01	T04	T05	T12
00	RIFERIMENTO	/	/	/	/
02	BPFI	✓	✓	✓	✓
03	BPFI	✓	✗	✗	✓
04	BSF	✓	✗	✗	✓
05	BSF	✗	✗	✓	✗
06	FTF	✓	✓	✓	✓
07	BPFO, BPFI, BSF, FTF	✗	✗	✗	✗
08	BPFO, BPFI, BSF, FTF	✓	✓	✓	✓
09	RIFERIMENTO	/	/	/	/
10	BPFI	✗	✗	✗	✓
11	BPFI	✗	✗	✗	✗
12	BSF	✓	✗	✗	✓
13	BSF	✓	✗	✓	✓
14	FTF	✓	✓	✓	✗
15	BPFO, BPFI, BSF, FTF	✓	✓	✓	✓
16	BPFI	✓	✓	✓	✗
17	BSF	✓	✗	✓	✗
18	RIFERIMENTO	/	/	/	/
23	RIFERIMENTO	/	/	/	/
24	BPFO, BPFI, BSF	✗	✗	✓	✓
25	BPFI	✗	✓	✓	✗
26	BPFO	✗	✗	✓	✓
27	BSF	✗	✗	✓	✓
28	BPFO, BPFI, BSF	✓	✗	✓	✓
29	BPFI	✗	✗	✗	✗
30	BPFO	✗	✗	✗	✗
31	BSF	✗	✗	✓	✗
32	BPFO	✓	✗	✗	✓
33	BPFO	✓	✗	✓	✓
34	BPFO	✓	✗	✗	✓
35	BPFO	✓	✓	✓	✓
36	BSF	✓	✓	✗	✓
37	FTF	✗	✓	✓	✓
38	BPFI	✓	✗	✓	✓
39	BPFO	✗	✗	✓	✓
40	RIFERIMENTO	/	/	/	/

## 4.2. Analisi dei dati di tensione e corrente

Per l'analisi dei segnali di tensione e corrente è stato utilizzato il medesimo programma.

A differenza del paragrafo precedente in cui l'analisi è stata suddivisa in base al test in quanto è stata utilizzata una sola tecnica, in questo paragrafo l'analisi viene suddivisa in base alla tecnica utilizzata.

Questo perché l'obiettivo è quello di verificare l'efficacia di una determinata tecnica di analisi nella diagnostica di difetti sui cuscinetti volventi.

A questo proposito i risultati ottenuti sulla base dei segnali di vibrazione sono da ritenersi e considerarsi un riferimento data la loro efficacia in termini diagnostici.

Ai dati di tensione e corrente viene applicata l'*Empirical Mode Decomposition* sull'intera lunghezza del segnale a disposizione (1 s) campionato alla fine del periodo T12 (vedi figura 3.5). Questo perché la tecnica scompone il segnale di partenza in bande di frequenza ed è quindi più probabile che esalti il contributo delle frequenze caratteristiche dei difetti.

Una volta generate le IMF, alle prime quattro estratte, contenenti le componenti ad alta frequenza, viene applicata una ulteriore tecnica di analisi dei segnali.

Si è deciso di utilizzare la trasformata di Fourier in accordo alla letteratura riguardante la diagnostica di danneggiamenti su cuscinetti volventi attraverso l'analisi di segnali di corrente [12] [20], l'*Envelope Analysis* e la *Spectral Kurtosis*, per indagare se tecniche più complesse possano restituire risultati più accurati data la natura non-stazionaria dei segnali analizzati.

Vengono riportati di seguito i risultati divisi per tecnica di analisi applicata ed, all'interno del paragrafo concernente ciascuna tecnica, divisi in base al fatto che siano misure di tensione o di corrente.

Preme sottolineare che nelle misure di tensione sono state ricercate ed eventualmente individuate le stesse frequenze caratteristiche che sono state definite per i segnali di corrente (vedi capitolo 3).

Questa assimilazione è legata al fatto che in bibliografia non sono presenti informazioni relative a questa tipologia di segnali; si è voluto comunque indagare se le misure di tensione possano sostituire oppure completare le misure di corrente.

In questa parte vengono considerati ed analizzati solo i test da TST 33 a TST 40, con esclusione del TST 37 in quanto il cuscinetto montato presenta un difetto sulla gabbia ed in questo caso non si dispone in bibliografia della definizione di frequenze caratteristiche per questo tipo di difetto.

#### 4.2.1. Empirical Mode Decomposition seguita da Fourier Transform

L'analisi dei segnali utilizzando questa tecnica non ha restituito risultati positivi. Analizzando il segnale di corrente proveniente dal motore REGINA, questa tecnica riesce ad identificare in modo chiaro solamente le armoniche dispari della frequenza di alimentazione del motore stesso. Nessun'altra frequenza caratteristica è presente.

Si sono analizzate sempre almeno le prime tre IMF, con risultati analoghi per ognuna di esse (vedi figure 4.47, 4.48 e 4.49).

L'analisi dei segnali di tensione ha condotto ai medesimi risultati: in nessun test sono state identificate le frequenze caratteristiche dei danneggiamenti.

Negli spettri sono sempre presenti solo le armoniche dispari della frequenza di alimentazione dell'inverter (vedi figure 4.50, 4.51 e 4.52).

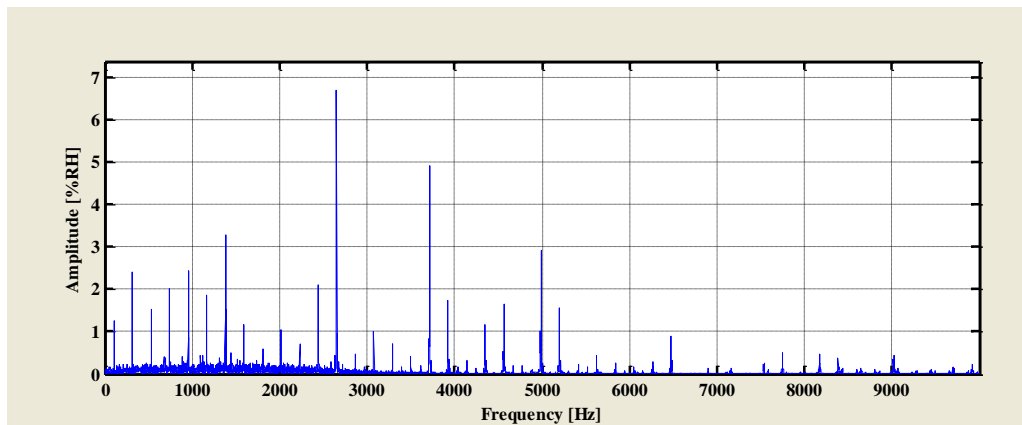


Figura 4.47 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + FT.

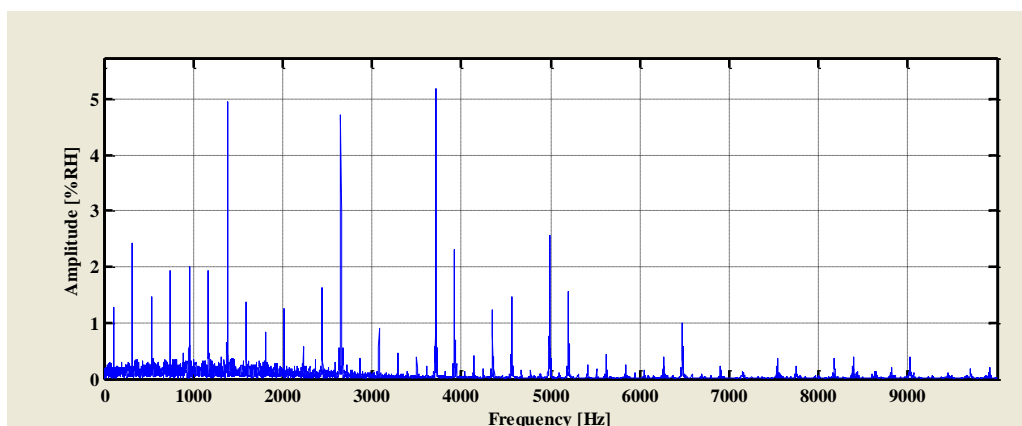


Figura 4.48 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + FT.



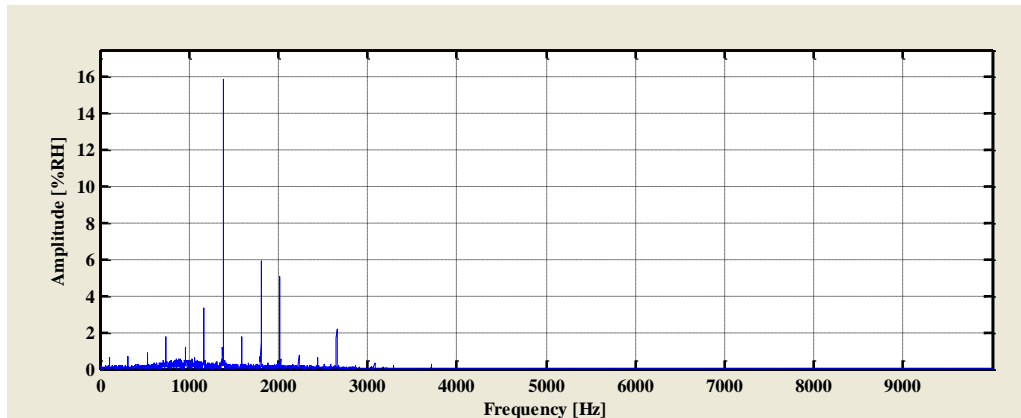


Figura 4.49 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + FT.

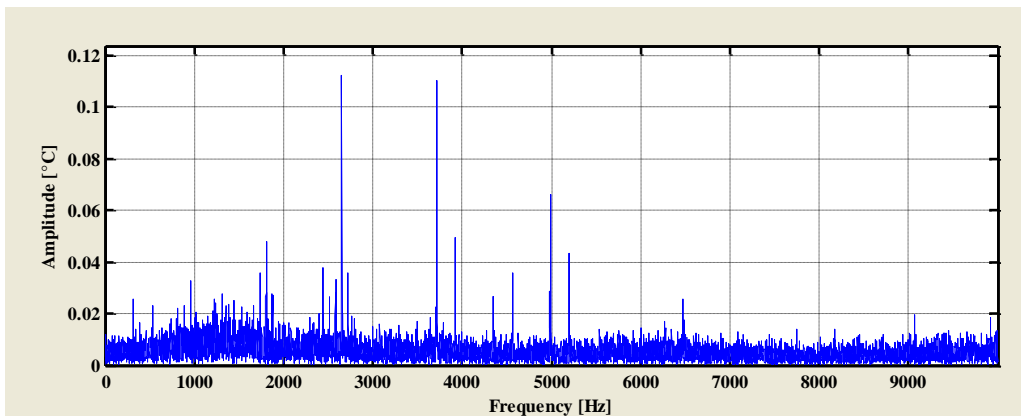


Figura 4.50 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + FT.

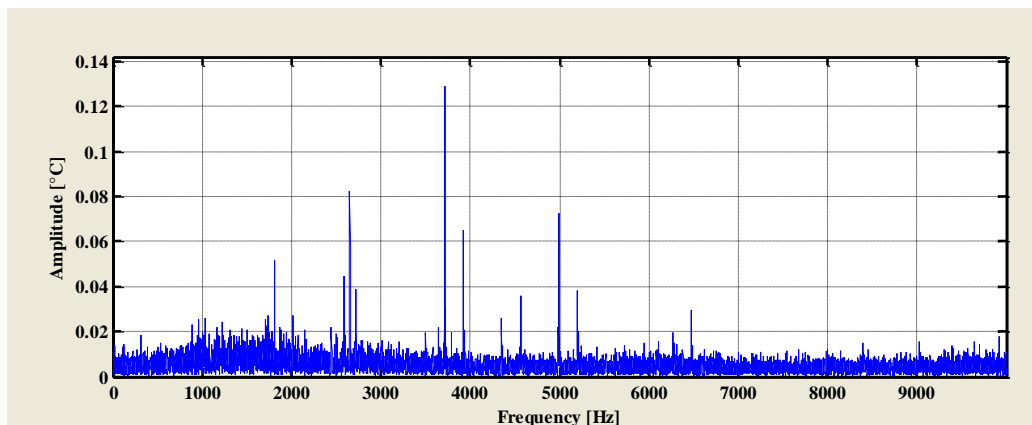


Figura 4.51 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + FT.

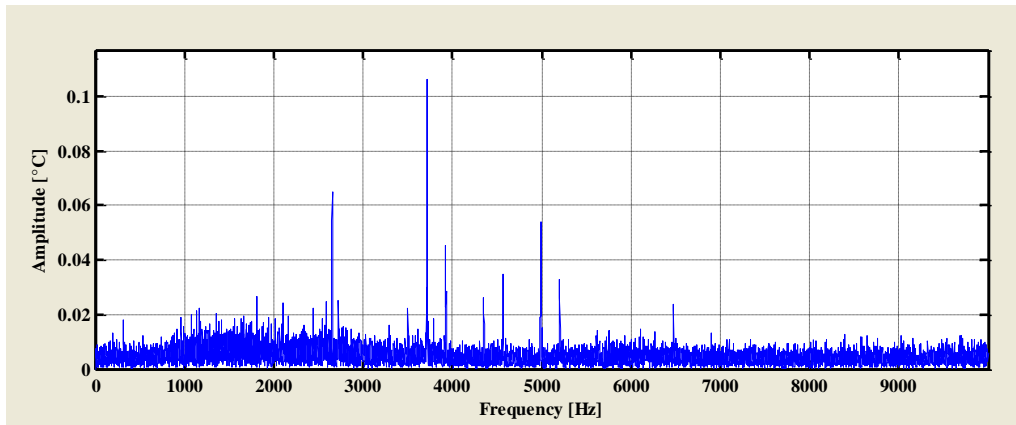


Figura 4.52 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + FT.

In tabella 4.2 sono riportati i risultati ottenuti con questa tecnica di analisi.

Tabella 4.2 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica EMD + FT.

SEGNALI DI CORRENTE			SEGNALI DI TENSIONE		
TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h	TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h
33	BPFO	✘	33	BPFO	✘
34	BPFO	✘	34	BPFO	✘
35	BPFO	✘	35	BPFO	✘
36	BSF	✘	36	BSF	✘
38	BPFI	✘	38	BPFI	✘
39	BPFO	✘	39	BPFO	✘
40	RIFERIMENTO	/	40	RIFERIMENTO	/

#### 4.2.2. *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Envelope Analysis*

Anche nel caso in cui si utilizzi questa tecnica di analisi, i risultati ottenuti non permettono la diagnostica del difetto.

Analizzando il segnale di corrente si riesce ad identificare in modo chiaro le armoniche pari della frequenza di alimentazione del motore e le armoniche della frequenza di rotazione della gabbia (FTF), anche se questa non presenta alcun difetto (vedi figure 4.53, 4.54 e 4.55).

Come nel caso precedente nessuna frequenza corrispondente ad un determinato difetto è presente in alcun test analizzato.

Similmente, l'analisi dei segnali di tensione non ha permesso di identificare il difetto presente in quanto gli spettri contengono solo le armoniche della frequenza di rotazione della gabbia (FTF).

Di seguito sono riportati gli spettri riguardanti la seconda IMF (vedi figura 4.56, 4.57 e 4.58).

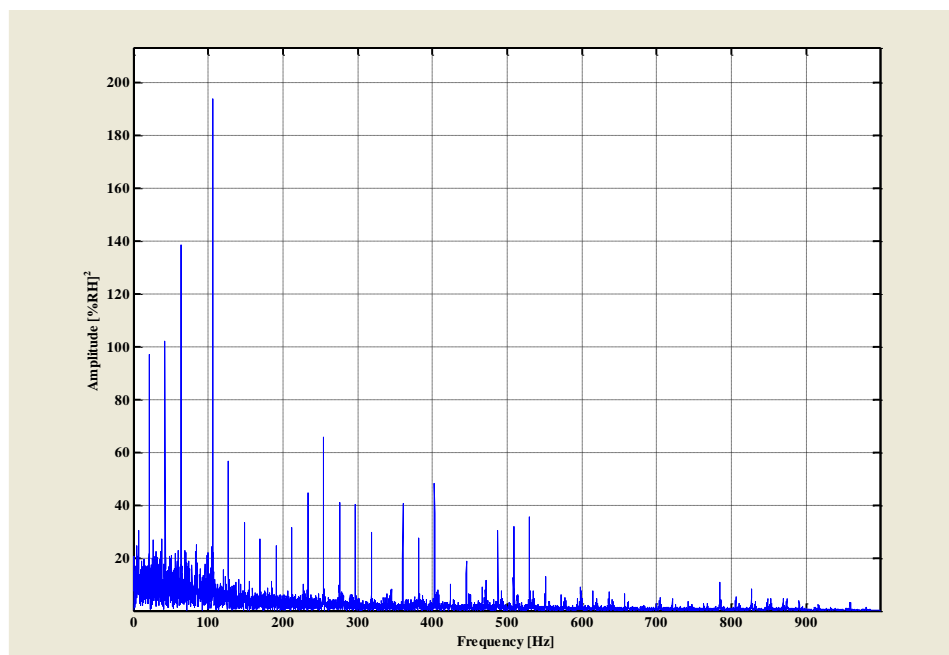


Figura 4.53 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + EA.

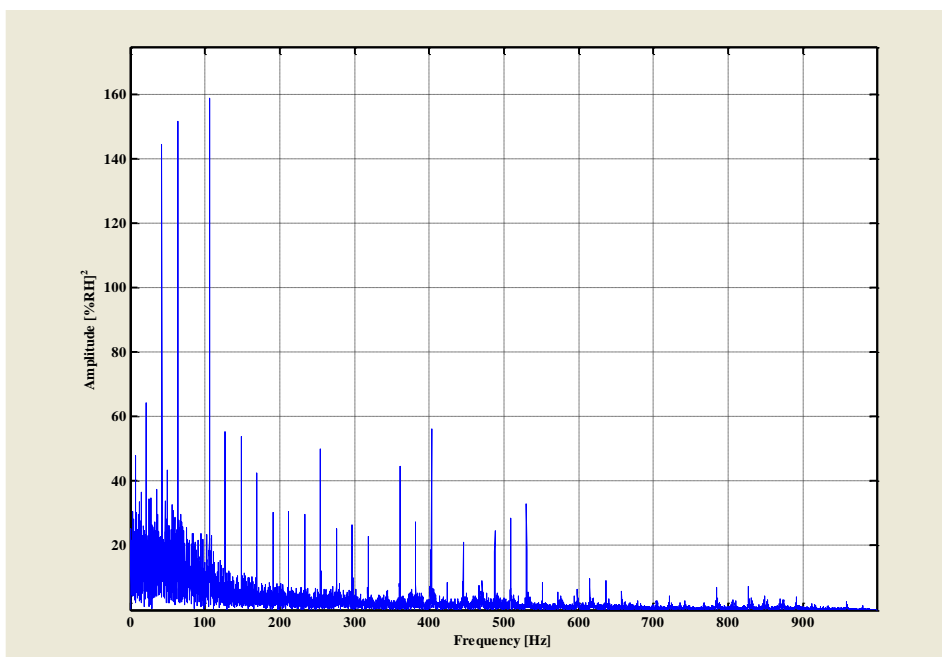


Figura 4.54 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + EA.

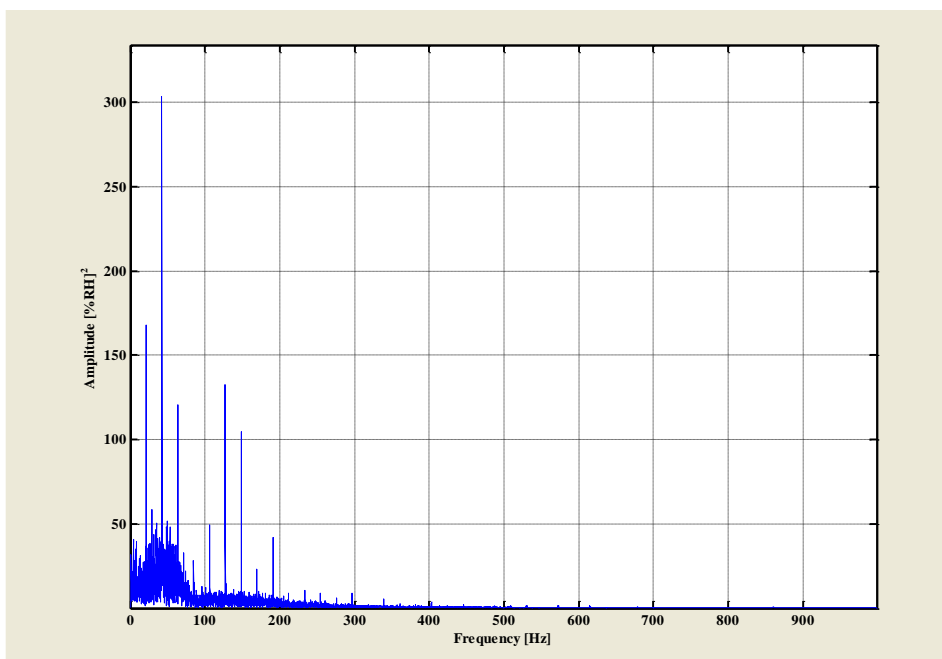


Figura 4.55 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + EA.

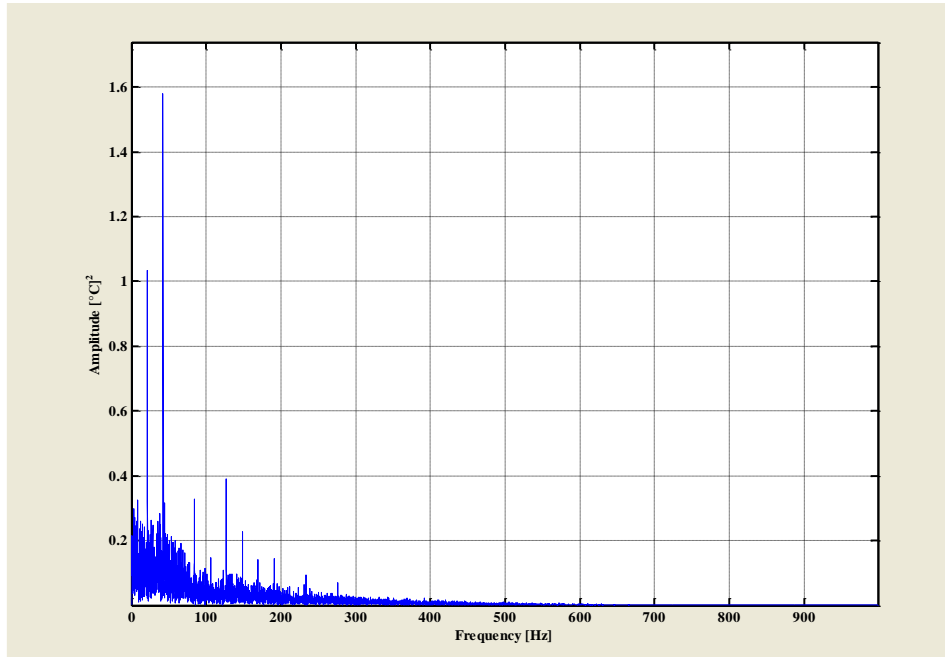


Figura 4.56 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 2, EMD + EA.

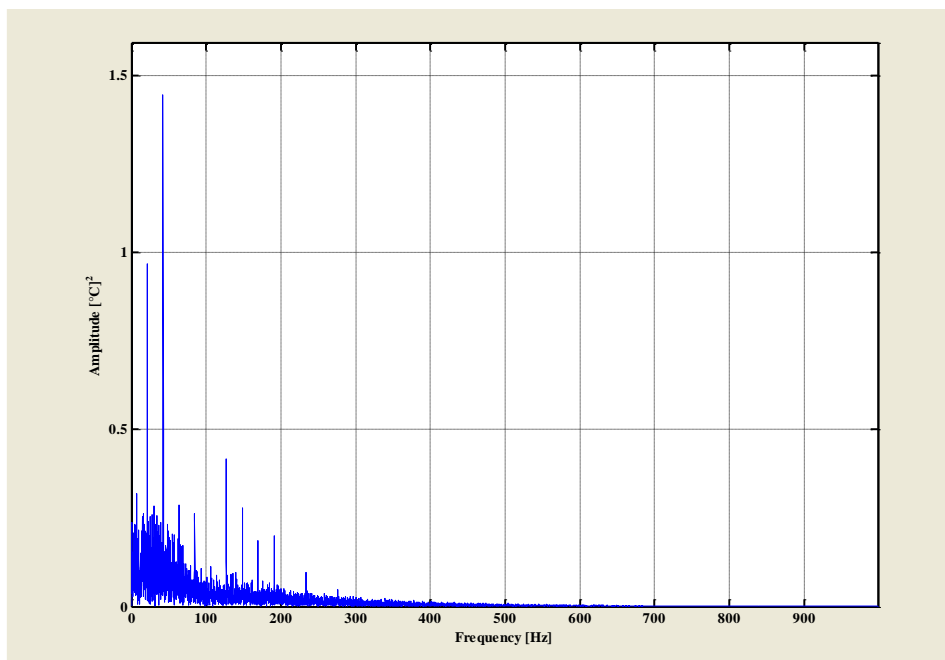


Figura 4.57 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 2, EMD + EA.

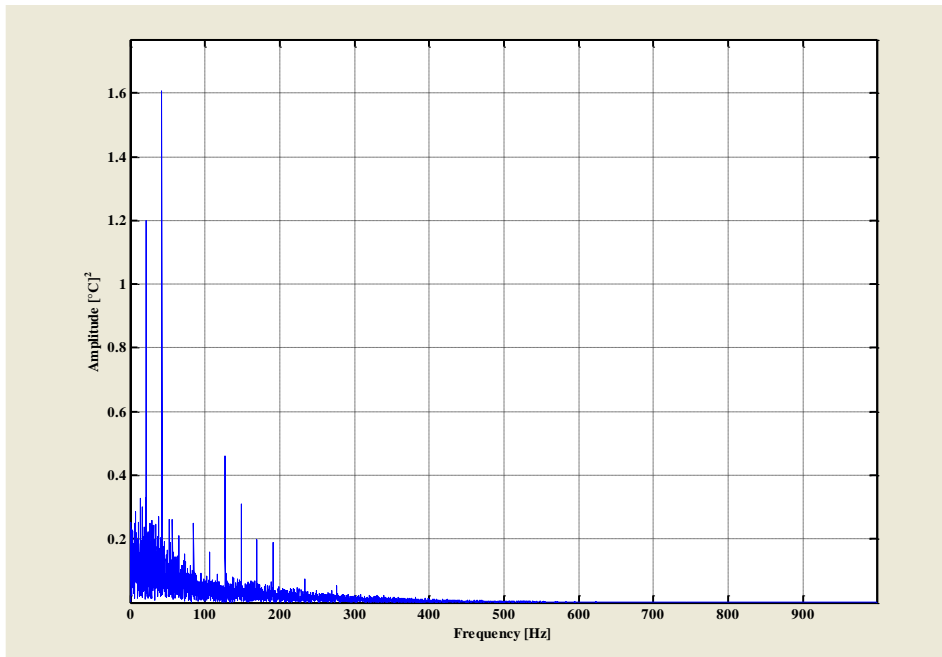


Figura 4.58 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 2, EMD + EA.

In tabella 4.3 sono riportati i risultati ottenuti con questa tecnica.

Tabella 4.3 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica EMD + EA.

SEGNALI DI CORRENTE			SEGNALI DI TENSIONE		
TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h	TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h
33	BPFO	✘	33	BPFO	✘
34	BPFO	✘	34	BPFO	✘
35	BPFO	✘	35	BPFO	✘
36	BSF	✘	36	BSF	✘
38	BPFI	✘	38	BPFI	✘
39	BPFO	✘	39	BPFO	✘
40	RIFERIMENTO	/	40	RIFERIMENTO	/

### 4.2.3. Empirical Mode Decomposition seguita da Spectral Kurtosis

I risultati ottenuti con questa tecnica ricalcano a grandi linee quello che è già stato esposto nei paragrafi 4.2.1 e 4.2.2.

Nell'analisi di segnali di corrente la tecnica riesce ad identificare in modo chiaro le armoniche pari della frequenza di alimentazione del motore e solo nel caso di difetto sull'elemento volvente la presenza del difetto viene diagnosticata (vedi figure 4.59, 4.60 e 4.61).

In questo caso (vedi figura 4.60) sono presenti le seguenti frequenze caratteristiche:

- $|f_s - BSF|$  (63,81 Hz);
- $|f_s + f_g - 2BSF|$  (210,93 Hz);
- $|f_s - 2BSF|$  (233.33 Hz);
- $|f_s + 3BSF|$  (614,27 Hz).

Al contrario, l'analisi dei segnali di tensione (vedi figure 4.62, 4.63 e 4.64) non ha permesso di identificare il difetto in quanto gli spettri contengono solo le armoniche di una frequenza riconducibile alla combinazione fra la frequenza di rotazione del motore e quella dell'utilizzatore ( $52,86 + 16,17 = 69,03$  Hz).

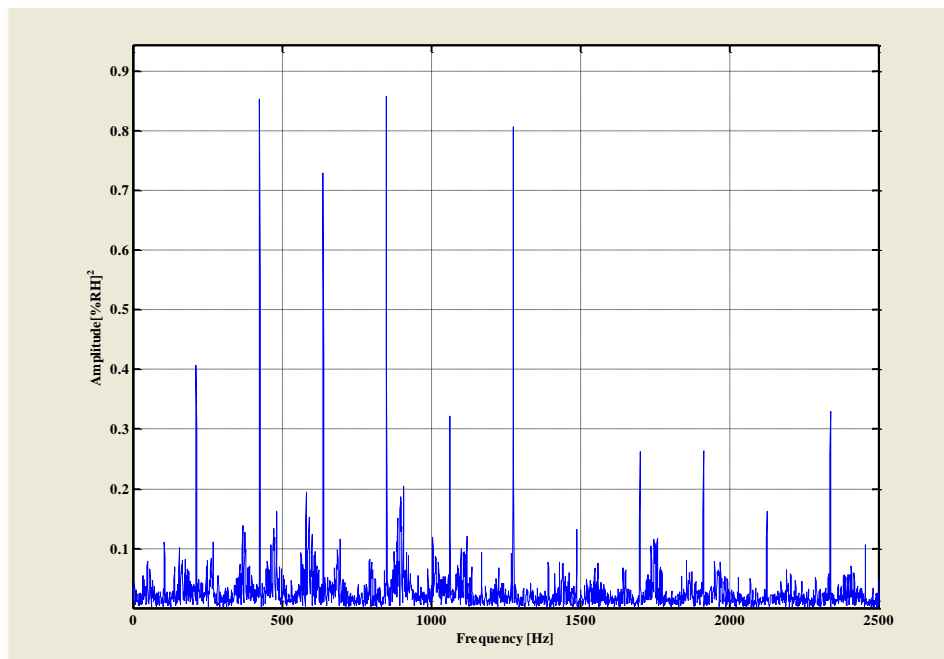


Figura 4.59 Spettro del segnale di corrente TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + SK.

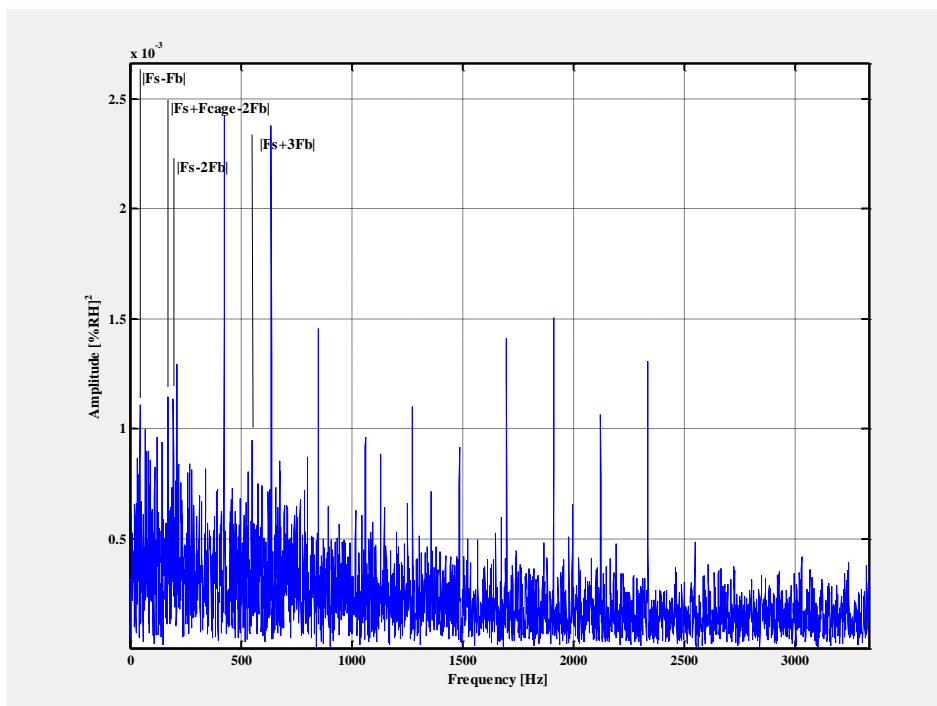


Figura 4.60 Spettro del segnale di corrente TST 36 - T 12, IMF 2, EMD + SK.

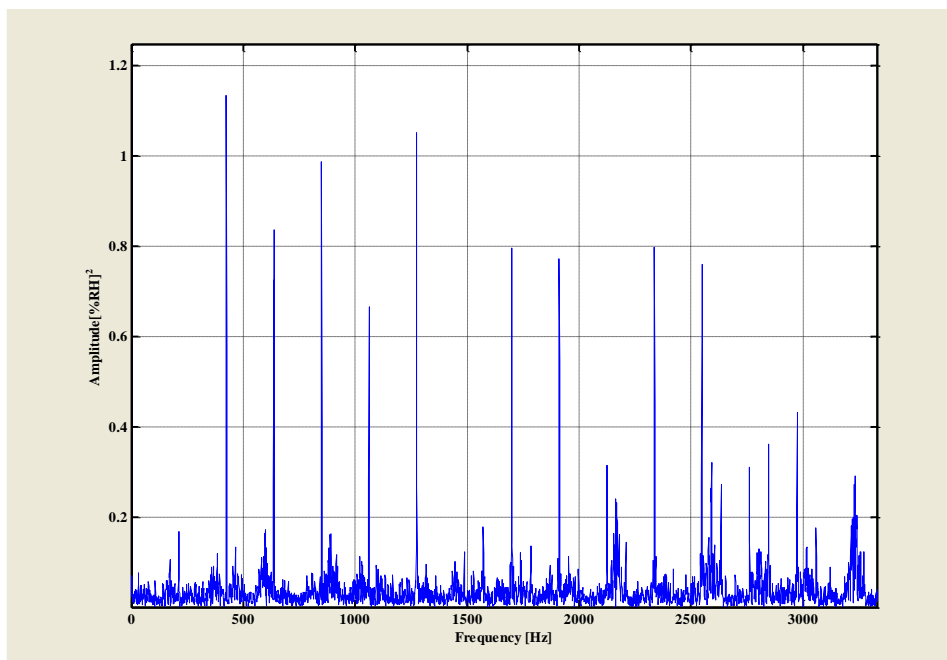


Figura 4.61 Spettro del segnale di corrente TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + SK.



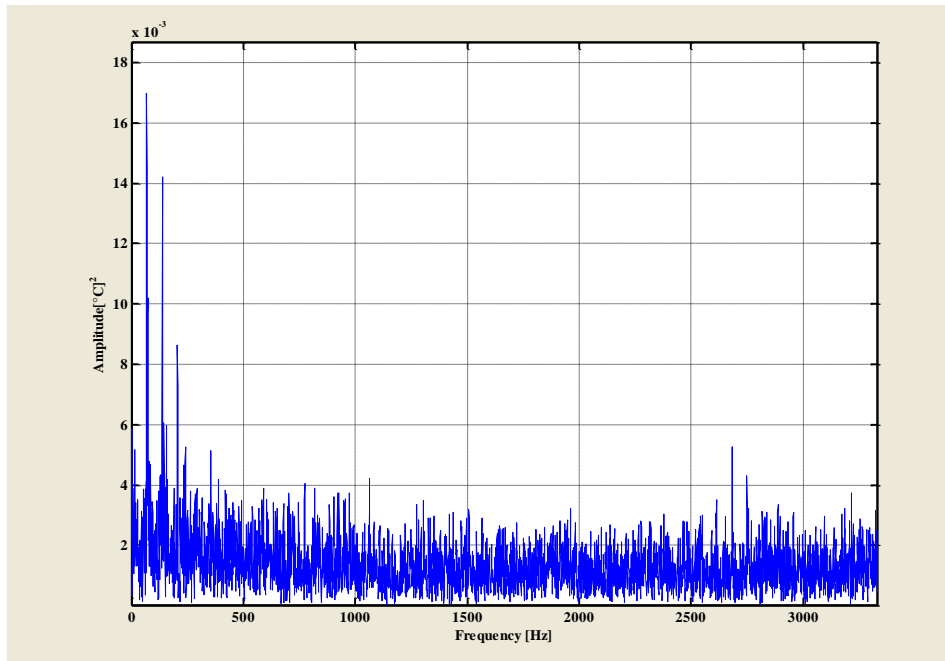


Figura 4.62 Spettro del segnale di tensione TST 35 - T 12, IMF 1, EMD + SK.

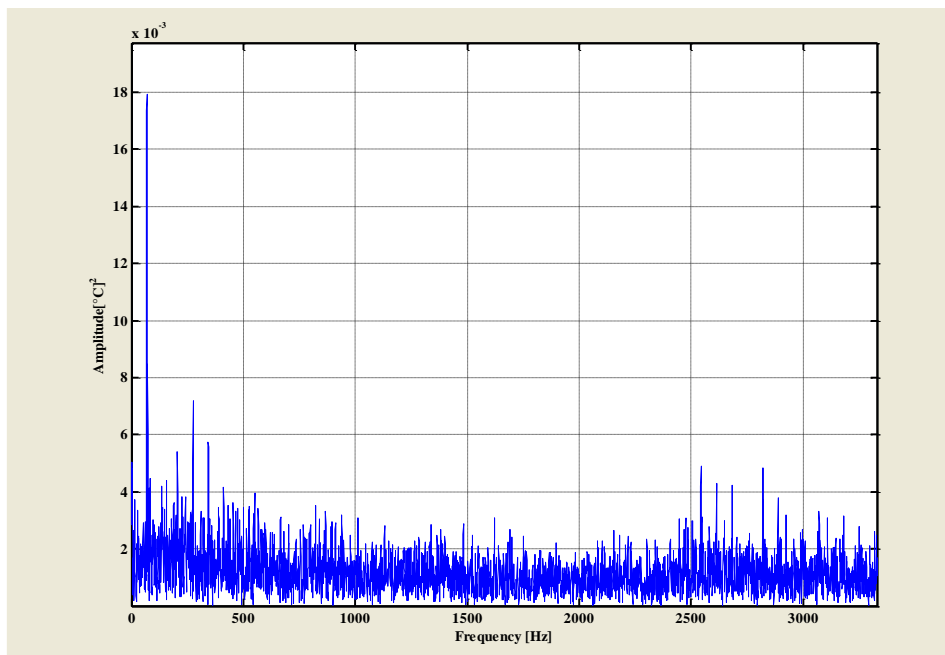


Figura 4.63 Spettro del segnale di tensione TST 36 - T 12, IMF 1, EMD + SK.

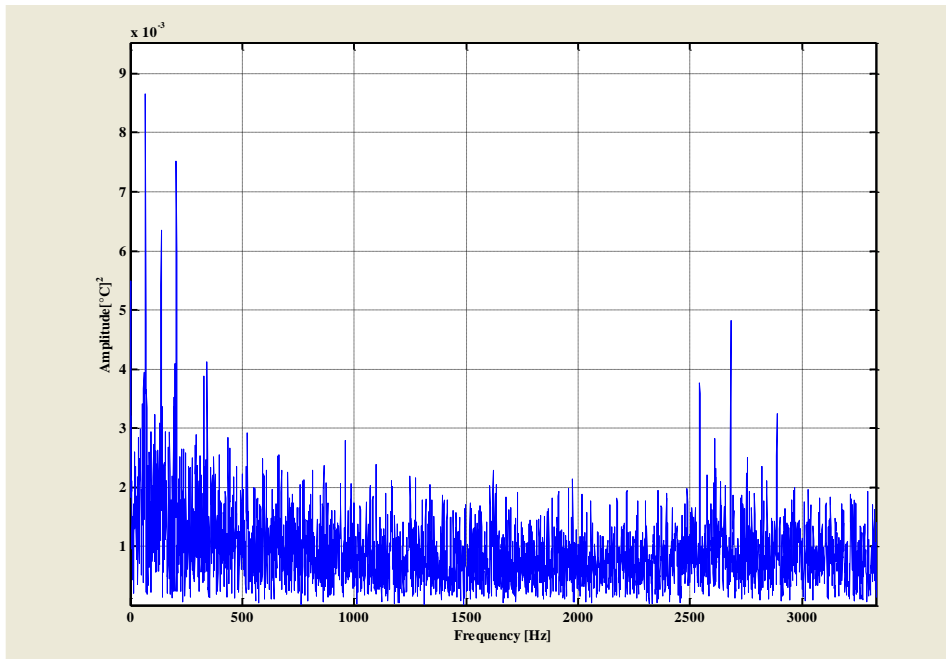


Figura 4.64 Spettro del segnale di tensione TST 38 - T 12, IMF 1, EMD + SK.

In tabella 4.4 sono riportati i risultati ottenuti con questa tecnica.

Tabella 4.4 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di tensione e corrente con la tecnica EMD + SK.

SEGNALI DI CORRENTE			SEGNALI DI TENSIONE		
TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h	TST	Frequenza ricercata	T12 Velocità costante 160 Km/h
33	BPFO	✗	33	BPFO	✗
34	BPFO	✗	34	BPFO	✗
35	BPFO	✗	35	BPFO	✗
36	BSF	✓	36	BSF	✗
38	BPFI	✗	38	BPFI	✗
39	BPFO	✗	39	BPFO	✗
40	RIFERIMENTO	/	40	RIFERIMENTO	/

#### 4.2.4. Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di tensione e corrente

Le tecniche considerate per l'analisi dei segnali di tensione e corrente provenienti dal banco prova per il sistema di trazione di un treno ad alta velocità non hanno dimostrato grande efficacia diagnostica.

Come si può notare è stato riscontrato un solo caso in cui sono state riconosciute frequenze caratteristiche riconducibili al difetto, ma comunque la loro ampiezza non è predominante rispetto alle altre componenti.

Le tecniche composte da *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Fourier Transform* o *Envelope Analysis* non hanno permesso di effettuare una diagnostica sullo stato del cuscinetto sfruttando i segnali di corrente provenienti dal motore. Infatti in nessuno dei test analizzati, per nessuna tipologia di difetto esaminata, è stato possibile riconoscere le frequenze caratteristiche dei danneggiamenti stimate come descritto in bibliografia (vedi paragrafo 2.2).

La tecnica composta da *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Spectral Kurtosis* ha permesso di identificare la presenza di un solo tipo di difetto (difetto sull'elemento volvente nel TST 36) attraverso il segnale di corrente del motore.

Per quanto riguarda l'analisi dei segnali di tensione, si sono indagate le medesime frequenze caratteristiche definite per l'analisi dei segnali di corrente, ma non è stato possibile diagnosticare la presenza del difetto con nessuna delle tre tecniche considerate.

In conclusione i risultati ottenuti attraverso una diagnostica *sensorless* non appaiono potersi sostituire a quelli di vibrazione precedentemente discussi.

Per valutare la dipendenza dell'efficacia diagnostica rispetto alla complessità del sistema considerato ed investigare la possibilità che questo tipo di diagnostica sia adatta per sistemi ed applicazioni più semplici, si è inteso effettuare prove sperimentali su un banco prova da laboratorio.



## 5. DESCRIZIONE DEL BANCO PROVA DA LABORATORIO

Nell'ottica di valutare l'efficacia diagnostica dell'approccio basato sull'analisi dei segnali di tensione e corrente per diagnosticare lo stato e la presenza di eventuali difetti sui cuscinetti volventi che supportano il rotore di un motore elettrico, nella seconda parte di questo lavoro di tesi si sono analizzati i dati provenienti da un banco prova allestito nel laboratorio di meccanica del politecnico di Milano, sede di Piacenza.

Si tratta, anche in questo caso, di un classico schema MTU (motore - trasmissione - utilizzatore) (vedi figura 5.1):

- **Motore:** Drive-AX SIEL.  
Caratteristiche tecniche: potenza 1,5 kW, velocità di rotazione massima 3000 rpm, coppia massima 9.55 Nm;
- **Trasmissione:** riduttore a ruote coniche a denti elicoidali, rapporto di trasmissione  $\tau = 34/17 = 2$ ;
- **Utilizzatore:** Drive-AX SIEL.  
Caratteristiche tecniche: potenza 1,5 kW, velocità di rotazione massima 3000 rpm, coppia massima 9.55 Nm.

Sia il motore che l'utilizzatore sono comandati tramite due inverter attraverso i quali è possibile impostare sia i valori di velocità che quelli di coppia resistente (nel caso che il motore funzioni da utilizzatore).



Figura 5.1 Banco prova del laboratorio del Politecnico di Milano – sede di Piacenza.

## 5.1. Strumentazione del banco prova

Il banco prova realizzato è stato strumentato con i seguenti sensori:

- accelerometri monoassiali con sensibilità 96 mV/g e fondo scala pari a 9000 Hz (vedi figura 5.2);
- *proximitor*;
- sensore di corrente ad effetto *Hall* con uscita in tensione  $\pm 4$  V (vedi figura 5.4);
- sensore di tensione con uscita in corrente 0-20 mA (vedi figura 5.5).

Per i *data sheet* completi si rimanda all'allegato A.

Inoltre vengono anche acquisiti i segnali di velocità provenienti dai due inverter. Il motore oggetto di analisi è quello lato utilizzatore quindi si è deciso di montare i due accelerometri sulla cassa del motore, in posizione centrale e secondo le direzioni orizzontale e verticale (non viene investigata la direzione assiale) (vedi figura 5.2).

Il *proximitor* è stato montato tra riduttore e utilizzatore e consente di rilevare il riferimento 1x giro dell'albero condotto.

I segnali di corrente e tensione sono stati ricavati a partire rispettivamente dalla fase W e U estratte dalla scatola di derivazione posta sul motore (vedi figura 5.3).

In particolare è stato necessario allungare il cavo della fase W in modo da allontanare il più possibile il sensore di corrente dal motore, a causa del campo magnetico prodotto dallo stesso che inficerebbe la misura restituita dal sensore.



Figura 5.2 Posizionamento degli accelerometri.

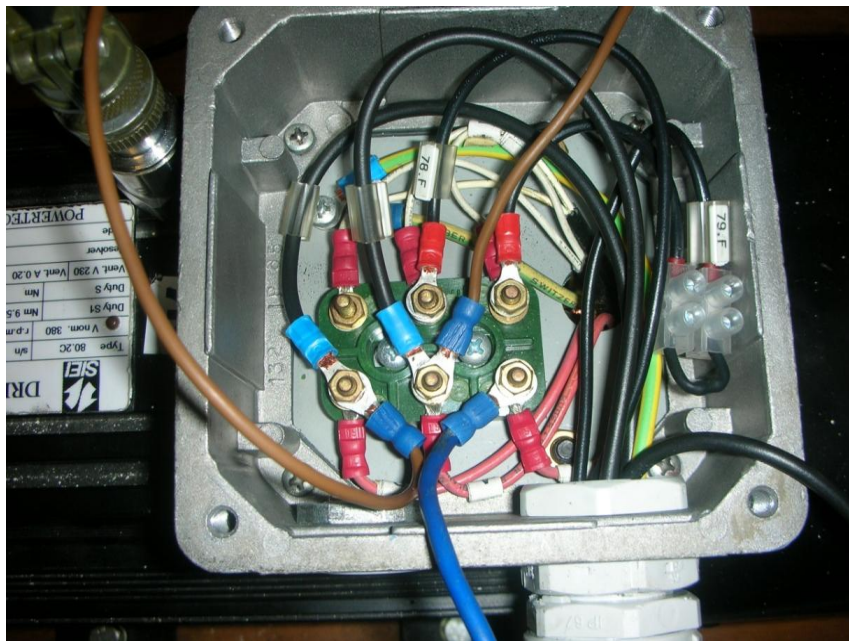


Figura 5.3 Scatola di derivazione posta sul motore da cui sono state estratte le fasi del motore.

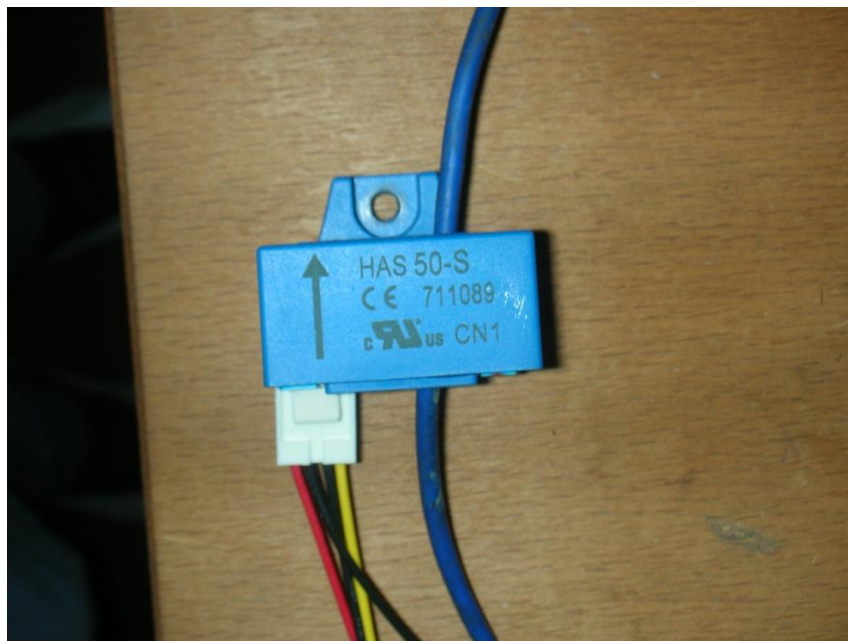


Figura 5.4 Sensore di corrente ad effetto *Hall* posto in prossimità del bordo del banco prova.

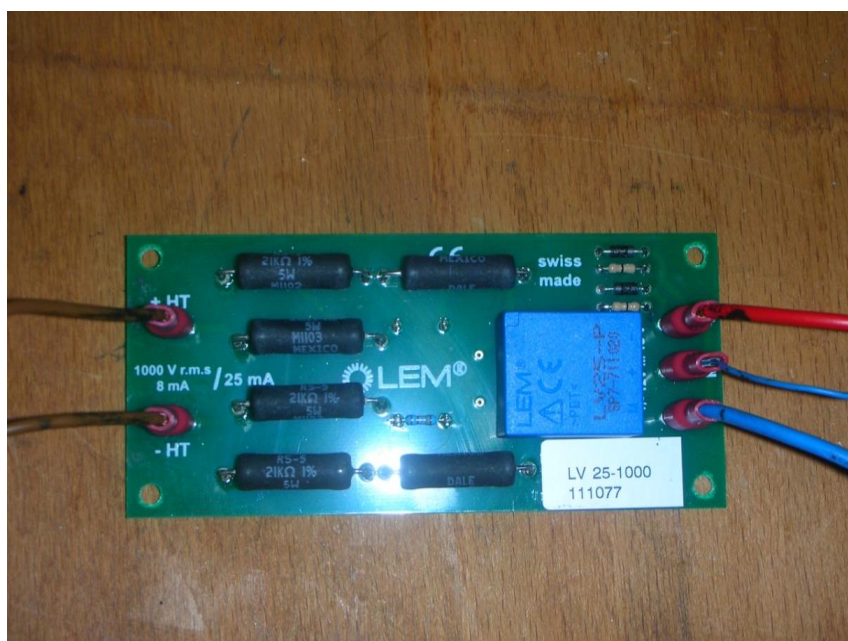


Figura 5.5 Sensore di tensione posto sul banco prova.



L'acquisizione dei dati avviene attraverso un sistema di acquisizione *National Instruments*, collegato al PC attraverso un cavo USB. Il software di acquisizione è stato realizzato tramite *LabView* (vedi figura 5.6).

Il sistema consta di tre schede di acquisizione:

- **NI 9234:** scheda di acquisizione per segnali in tensione, utilizzata per i due accelerometri e il *proximitor*. La scheda ha 4 ingressi, risoluzione pari a 24 bit, frequenza di acquisizione massima pari a 51200 Hz e alimenta i canali;
- **NI 9215:** scheda di acquisizione per segnali in tensione, utilizzata per il sensore di corrente e i canali provenienti dagli inverter. La scheda ha 4 ingressi, risoluzione pari a 16 bit, frequenza di acquisizione massima pari a 100000 Hz e non alimenta i canali;
- **NI 9203:** scheda di acquisizione per segnali in corrente, utilizzata per il sensore di tensione. La scheda ha 8 ingressi, risoluzione pari a 16 bit, frequenza di acquisizione massima pari a 200000 Hz.

I valori di velocità e coppia resistente sono forniti agli inverter mediante programmazione attraverso l'interfaccia utente degli stessi.

Essi controllano i motori e forniscono in uscita il valore reale della velocità del motore e quello della coppia dell'utilizzatore.

Si effettua un campionamento asincrono con frequenza pari a 25,6 kHz.

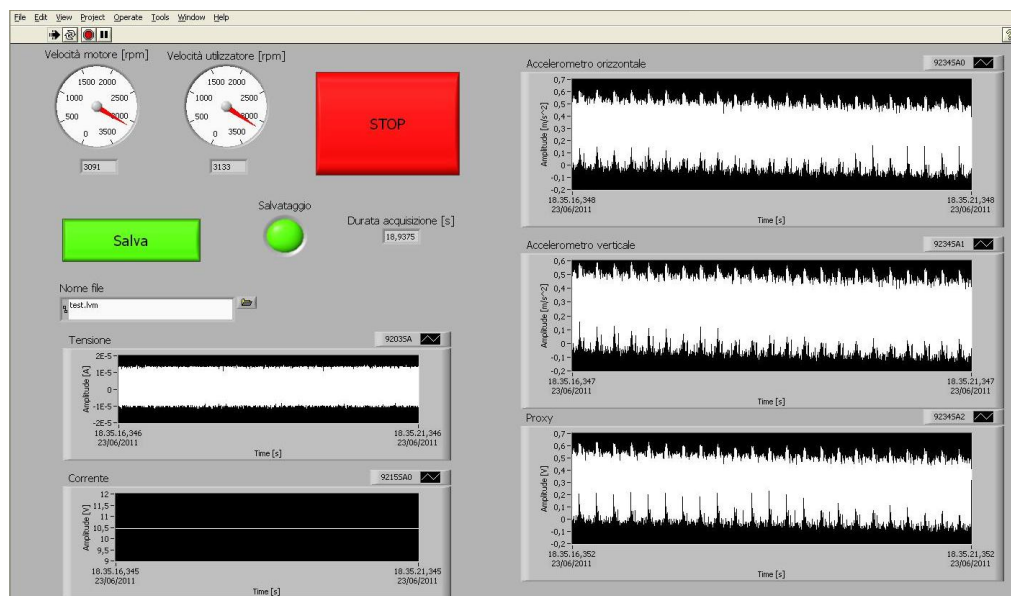


Figura 5.6 Interfaccia del software di acquisizione.

## 5.2. Tipologia di cuscinetti utilizzati

La valutazione della metodologia è stata realizzata a partire dai segnali provenienti dal motore che funziona da utilizzatore.

Gli originali montati in sede di costruzione del motore sono cuscinetti a sfere non scomponibili; per le prove sono stati sostituiti con due cuscinetti a rulli cilindrici scomponibili aventi medesime dimensioni e caratteristiche dal punto di vista dinamico.

I cuscinetti in oggetto sono forniti dalla SKF e contraddistinti dalla sigle NJ 205 ECP e NJ 204 ECP (vedi figura 5.7). In tabella 5.1 ne sono riportate le caratteristiche geometriche.

Tabella 5.1 Caratteristiche geometriche dei cuscinetti.

	SKF - NJ 205 ECP	SKF - NJ 204 ECP
Diametro interno $d$ [mm]	25	20
Diametro esterno $D$ [mm]	52	47
Spessore $B$ [mm]	15	14
Diametro elemento volvente [mm]	7.5	7.5
Coefficiente di carico dinamico $C$ [kN]	28.6	25.1
Coefficiente di carico statico $C_0$ [kN]	27	22
Carico limite di fatica $P_u$ [kN]	3.35	2.75
Velocità di riferimento [rpm]	14000	16000
Velocità limite [rpm]	16000	19000
Massa [Kg]	0.15	0.11

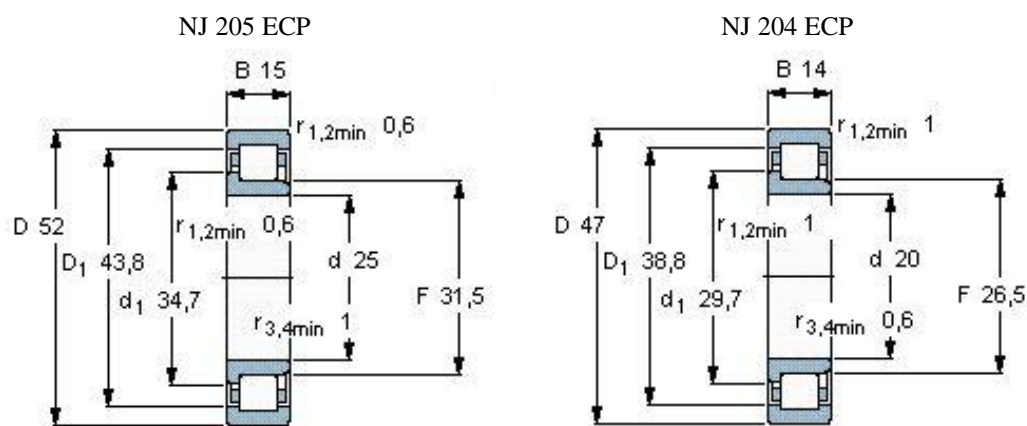


Figura 5.7 Caratteristiche geometriche dei cuscinetti.

### 5.3. Tipologia dei test effettuati

Sono stati effettuati 8 test (vedi tabella 5.3) strutturati secondo un piano fattoriale in cui viene variata la velocità del motore e la coppia resistente dell'utilizzatore (vedi tabella 5.2).

I *range* di variazione sono:

- **velocità:** 1000 – 3000 rpm con passi pari a 1000 rpm (quindi 500 – 1500 rpm con passi pari a 500 rpm per l'utilizzatore);
- **coppia resistente:** 35% e 70% della coppia disponibile al regime di rotazione considerato.

Il test 1 è un test di riferimento: è stato effettuato per conoscere il comportamento del gruppo MTU in condizioni di normale funzionamento (cuscinetti integri). Nei test successivi sono stati sostituiti i cuscinetti integri con altri recanti diversi tipi di danneggiamento (vedi tabella 5.3).

In ogni test è stato effettuato un periodo di riscaldamento dei motori e della trasmissione per portare il sistema a regime di temperatura.

Una volta raggiunta la temperatura di esercizio, sono stati impostati i valori di velocità e coppia sugli inverter di comando dei motori e si è proceduto al campionamento dei segnali provenienti dalla sensoristica montata sul banco prova per una durata di circa 30 s.

Per l'analisi dei dati di vibrazione però non si è considerata l'intera lunghezza del segnale campionato, ma ci si è concentrati solo su di una parte di esso, della durata di 10 s (dal secondo 10 al secondo 20 dell'acquisizione originale).

Per l'analisi dei dati di tensione e corrente si è utilizzata solamente una parte del segnale della durata di 2 s (dal secondo 14 al secondo 16 dell'acquisizione originale) a causa dell'elevato onere computazionale richiesto dall'utilizzo delle tecniche di analisi di questo tipo di segnali.

Si è deciso di analizzare solo le parti centrali dei segnali acquisiti dopo aver verificato che non vi sono differenze sostanziali nei risultati ottenuti spostando l'intervallo di tempo analizzato lungo l'intero segnale campionato.

Tabella 5.2 Condizioni di funzionamento delle prove effettuate in ogni test.

Velocità \ Coppia	35%	70%
500 rpm	500_35	500_70
1000 rpm	1000_35	1000_70
1500 rpm	1500_35	1500_70

**Tabella 5.3 Test effettuati.**

<b>Numero test</b>	<b>Cuscinetto NJ 205 ECP</b>	<b>Cuscinetto NJ 204 ECP</b>
1	Integro	Integro
2	Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto	Integro
3	Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto	Integro
4	Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni sulla pista interna del cuscinetto	Integro
5	Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista interna del cuscinetto	Integro
6	Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni su 1 elemento volvente del cuscinetto	Integro
7	Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni su 3 elementi volventi del cuscinetto	Integro
8	Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista interna del cuscinetto	Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto

## 5.4. Danneggiamento dei cuscinetti

I cuscinetti hanno subito una serie di danneggiamenti sui loro componenti, di diversa entità e posizione (vedi tabelle 5.4 e 5.5).

**Tabella 5.4** Descrizione danneggiamenti cuscinetto SKF - NJ 205 ECP.

DESCRIZIONE	
Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto	
Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto	
Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni su un elemento volvente del cuscinetto	
Difetto dovuto a danneggiamento di piccole dimensioni sulla pista interna del cuscinetto	
Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista interna del cuscinetto	

**Tabella 5.5 Descrizione danneggiamenti cuscinetto SKF - NJ 204 ECP.**

DESCRIZIONE	
<p>Difetto dovuto a danneggiamento di medie dimensioni sulla pista esterna del cuscinetto</p>	

### 5.5. Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione

In tabella 5.6 sono indicate le frequenze caratteristiche dei componenti meccanici montati sul banco, differenziate in base alla velocità di rotazione del motore. Non vengono effettuati test in transitorio.

**Tabella 5.6 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di vibrazione.**

Velocità motore [rpm]	1000	2000	3000
Frequenza di rotazione motore [Hz]	16.67	33.34	50.00
Velocità utilizzatore [rpm]	500	1000	1500
Frequenza di rotazione utilizzatore [Hz]	8.34	16.67	25.00
Frequenza di ingranamento [Hz]	283.34	566.67	850.00
Frequenza di alimentazione utilizzatore [Hz]	16.67	33.34	50.00
<b>CUSCINETTO SKF - NJ 205 ECP</b>			
BPFO [Hz]	43.61	87.23	130.85
BPFI [Hz]	64.72	129.50	194.16
FTF [Hz]	3.36	6.71	10.07
BSF [Hz]	41.16	82.31	123.47
<b>CUSCINETTO SKF – NJ 204 ECP</b>			
BPFO [Hz]	35.57	71.15	106.71
BPFI [Hz]	56.10	112.19	168.28
FTF [Hz]	3.23	6.47	9.70
BSF [Hz]	35.36	70.71	106.07

## 5.6. Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente

Oltre alle frequenze indicate in tabella 5.6, per l'analisi di segnali ricavati dalla misura di tensione e corrente si fa riferimento alle frequenze riportate in tabella 5.7.

Tabella 5.7 Frequenze caratteristiche per analisi di segnali di tensione e corrente.

Velocità motore [rpm]	1000	2000	3000
Frequenza di rotazione motore [Hz]	16.67	33.34	50.00
Frequenza di rotazione utilizzatore $f_r$ [Hz]	8.34	16.67	25.00
Frequenza di alimentazione utilizzatore $f_s$ [Hz]	16.67	33.34	50.00
<b>CUSCINETTO SKF - NJ 205 ECP</b>			
$f_g$ [Hz]	3.36	6.71	10.07
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$16.67 \pm k 43.61$	$33.34 \pm k 87.23$	$50.00 \pm k 130.85$
$f =  f_s \pm f_r \pm k BPF1 $ [Hz]	$16.67 \pm k 8.34$ $\pm k 64.72$	$33.34 \pm k 16.67$ $\pm k 129.50$	$50.00 \pm k 25.00$ $\pm k 194.16$
$f =  f_s \pm f_g \pm k BSF $ [Hz]	$16.67 \pm k 3.36$ $\pm k 41.16$	$33.34 \pm k 6.71$ $\pm k 82.31$	$50.00 \pm k 10.07$ $\pm k 123.47$
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$16.67 \pm k 43.61$	$33.34 \pm k 87.23$	$50.00 \pm k 130.85$
$f =  f_s \pm k BPF1 $ [Hz]	$16.67 \pm k 64.72$	$33.34 \pm k 129.50$	$50.00 \pm k 194.16$
$f =  f_s \pm k BSF $ [Hz]	$16.67 \pm k 41.16$	$33.34 \pm k 82.31$	$50.00 \pm k 123.47$
<b>CUSCINETTO SKF - NJ 204 ECP</b>			
$f =  f_s \pm k BPF0 $ [Hz]	$16.67 \pm k 35.57$	$33.34 \pm k 71.15$	$50.00 \pm k 106.71$





## 6. ANALISI DEI DATI DEL BANCO PROVA DA LABORATORIO

I dati provenienti dal banco prova da laboratorio sono stati analizzati mediante lo stesso programma utilizzato per l'analisi dei dati del banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità.

I segnali di vibrazione sono stati utilizzati come riferimento per le successive analisi dei segnali di tensione e corrente. Su questo tipo di segnali sono state applicate due tecniche: *Spectral Kurtosis* ed *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Spectral Kurtosis*.

Successivamente sono stati analizzati i dati di tensione e corrente per ogni singolo test utilizzando esclusivamente la tecnica *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Spectral Kurtosis* in quanto è stata ritenuta la tecnica più appropriata e con una efficacia diagnostica migliore delle altre tecniche utilizzate nell'analisi dei dati provenienti dal banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità (capitolo 4). In seguito sono stati confrontati i risultati.

### 6.1. Analisi dei dati di vibrazione

In questo tipo di analisi valgono tutte le considerazioni fatte nel paragrafo 4.1.

Preme sottolineare che per l'analisi dei segnali di vibrazione, nella scelta della banda in frequenza sul *Kurtogram*, non si sono mai superati i 9000 Hz, limite superiore della banda passante degli accelerometri. Per quanto riguarda la procedura di analisi applicata si faccia riferimento al paragrafo 5.3.

Vengono di seguito riportati i risultati dei test. Per non appesantire la trattazione, in ogni test sono stati riportati solamente gli spettri dei segnali di uno dei due canali provenienti dagli accelerometri in quanto i risultati forniti sono i medesimi (vedi figure 6.1 e 6.2, 6.3 e 6.4).

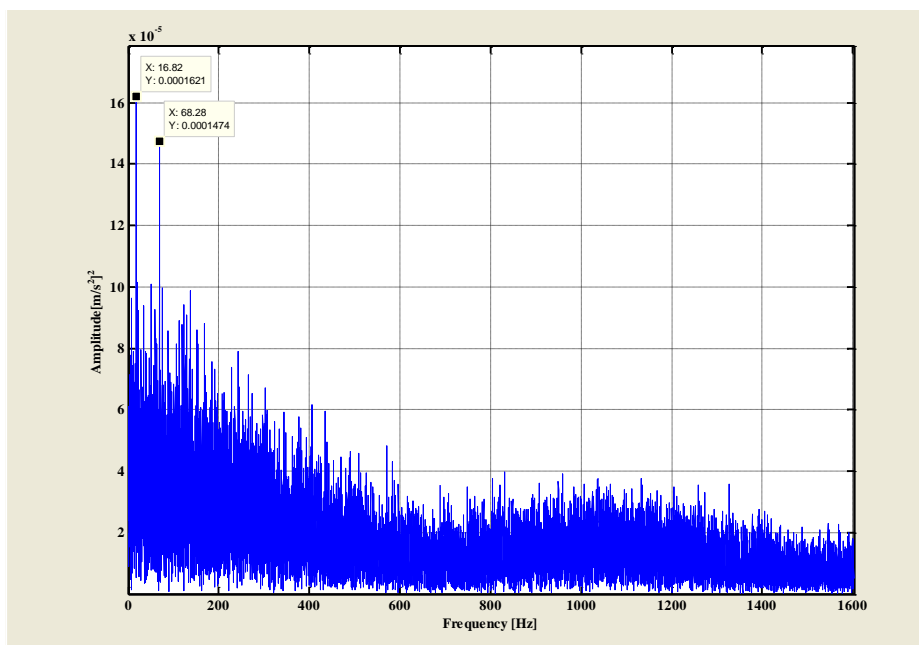
#### 6.1.1. Test di riferimento: test 1

In questo test sul motore sono montati due cuscinetti integri.

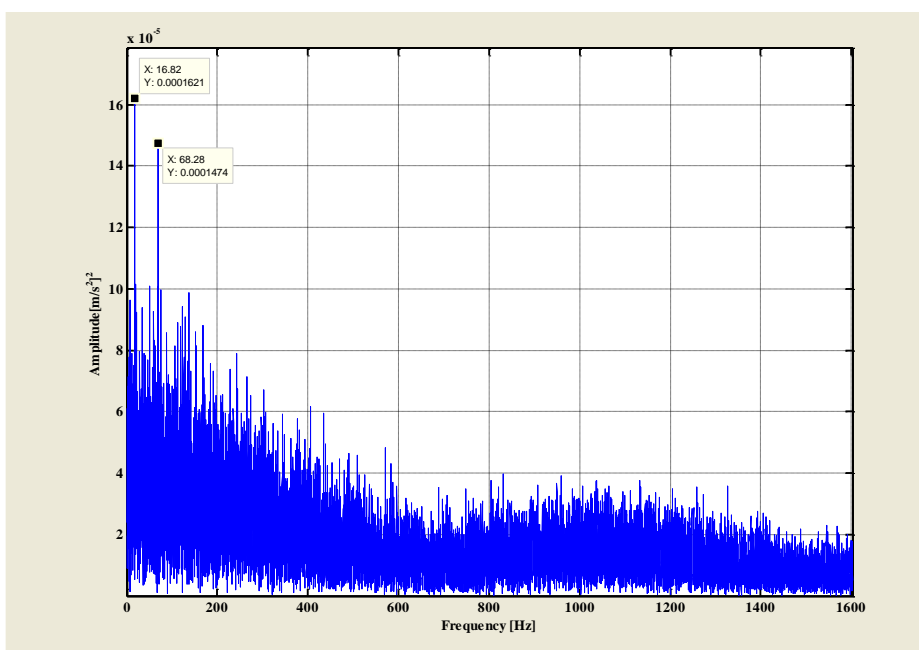
Negli spettri dei segnali di vibrazione sono presenti le armoniche della velocità del motore e le armoniche della frequenza di alimentazione dello stesso (vedi figure da 6.1 a 6.10).

Non è presente nessuna frequenza caratteristica riconducibile ad alcun difetto.

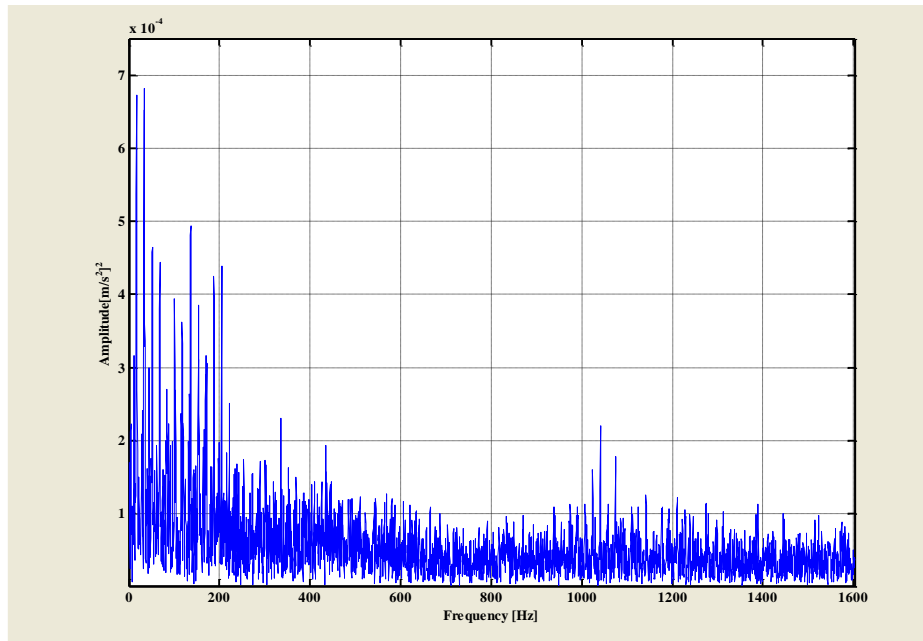
I risultati ottenuti con la tecnica EMD + SK portano alle medesime conclusioni.



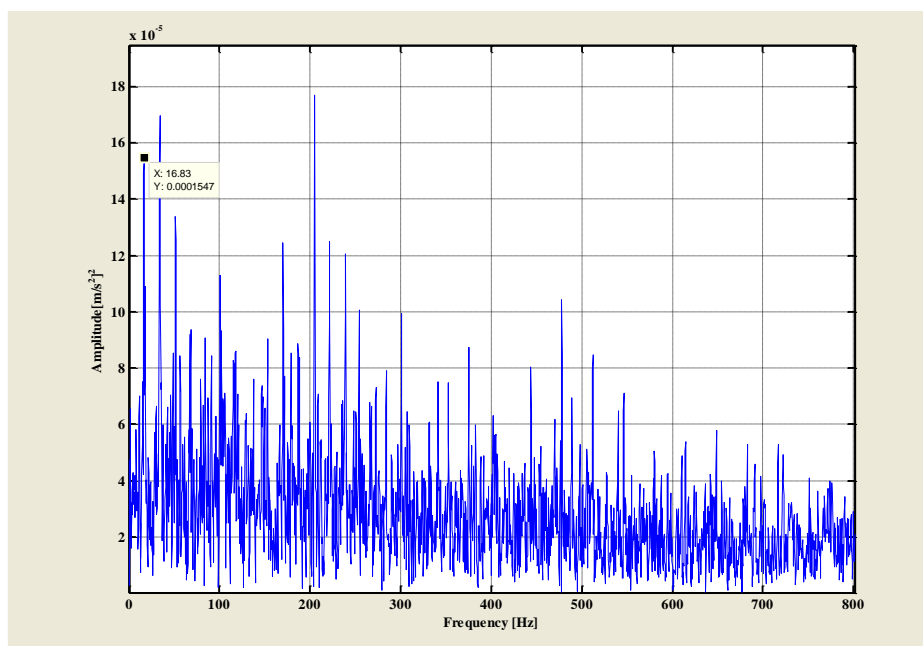
**Figura 6.1** Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



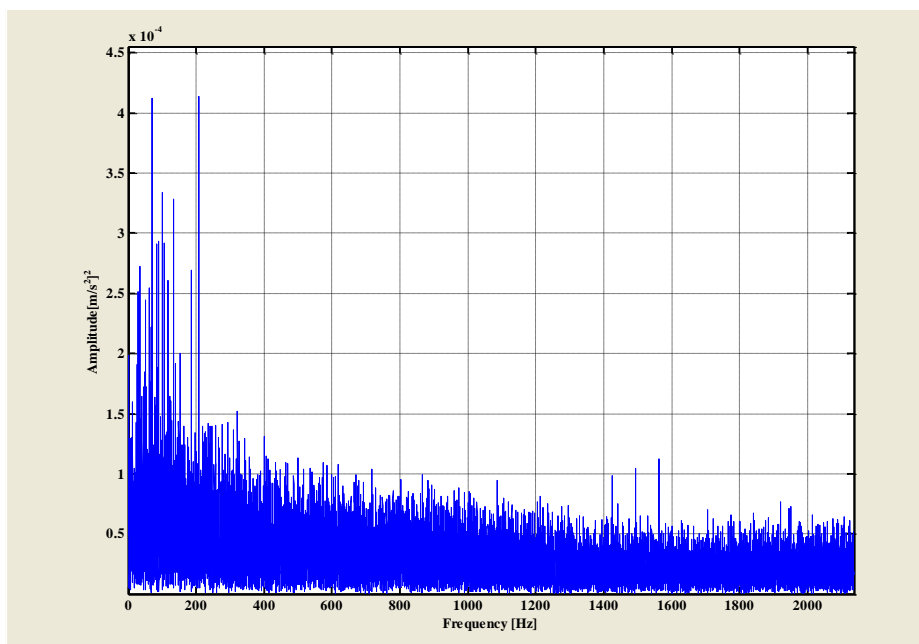
**Figura 6.2** Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



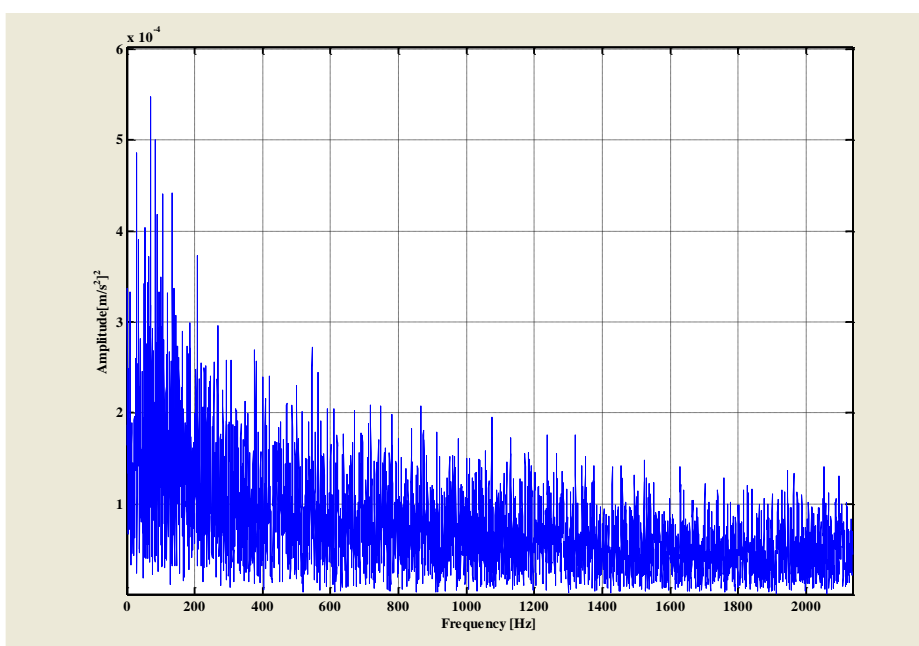
**Figura 6.3** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.4** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.5** Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.



**Figura 6.6** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.

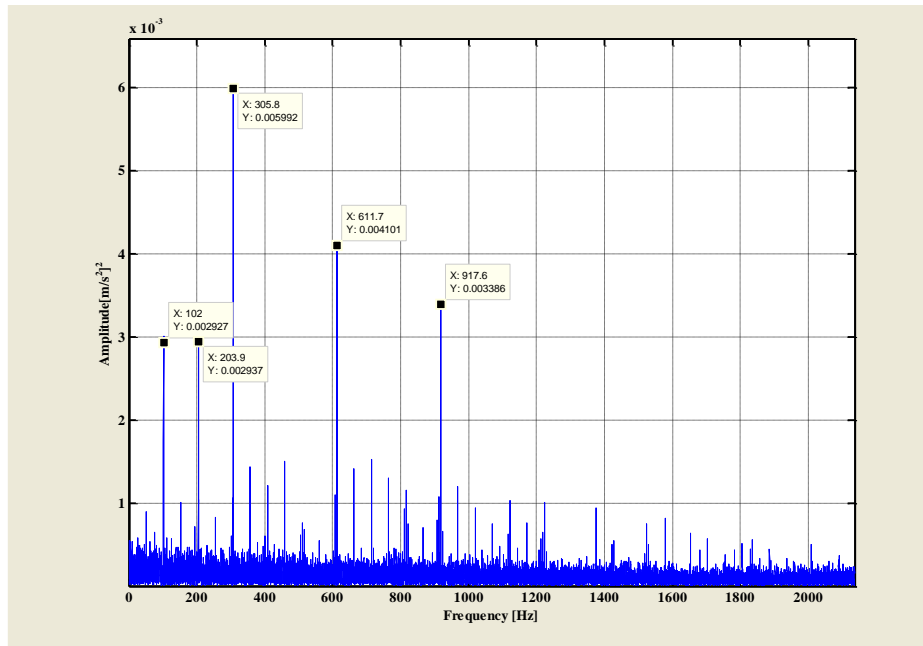


Figura 6.7 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

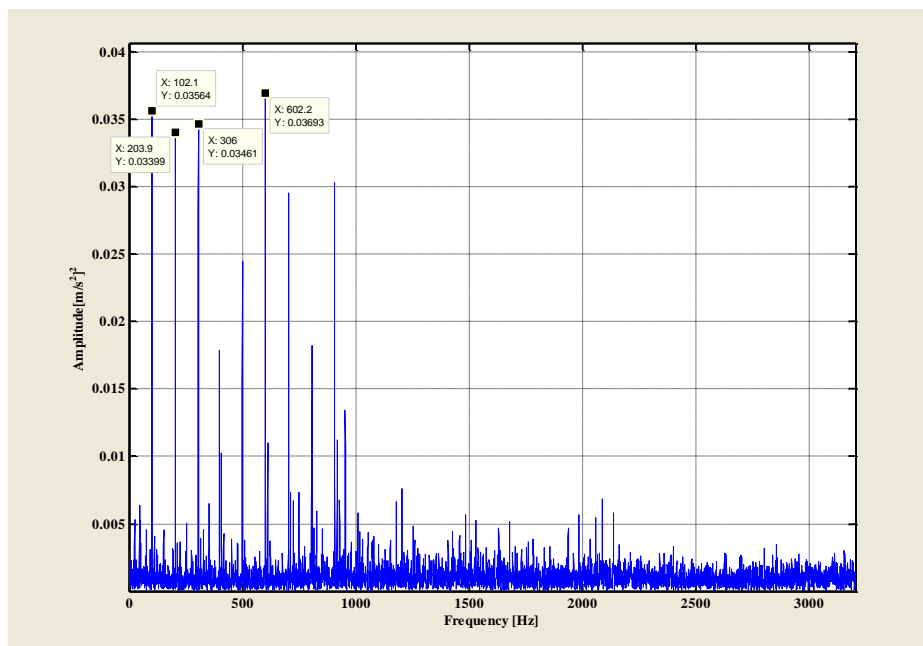
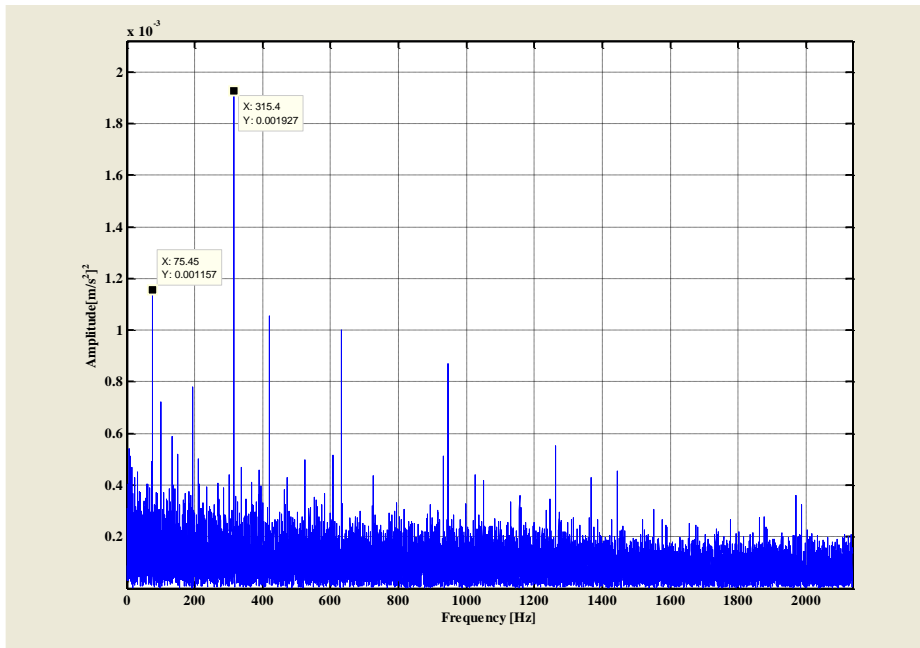
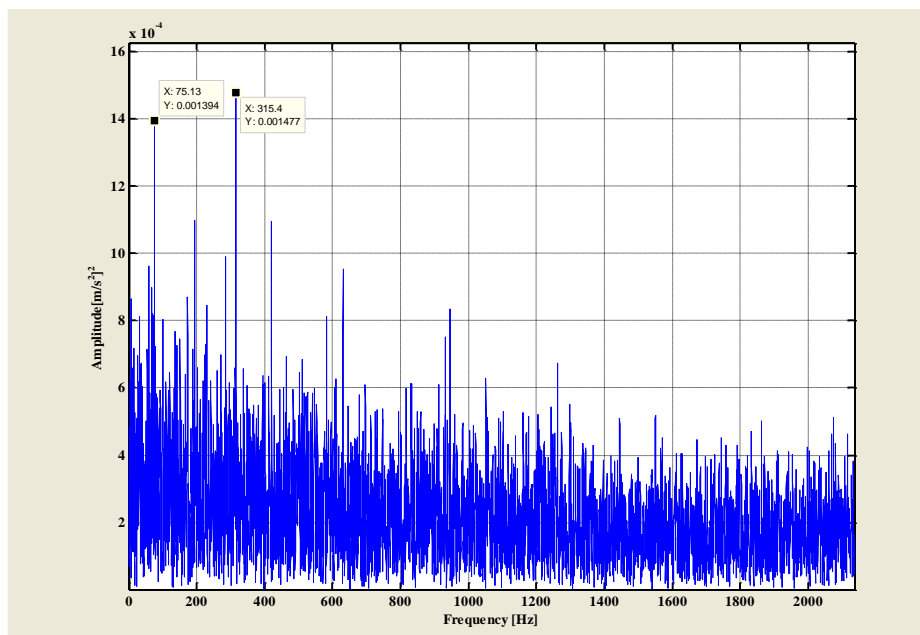


Figura 6.8 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.9** Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.



**Figura 6.10** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione orizzontale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

### 6.1.2. Difetto sulla pista esterna: test 2

In questo test, sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento sulla pista esterna di piccola entità.

L'analisi dei dati di vibrazione mostra che, utilizzando la SK, è possibile individuare la presenza del difetto sia a basse che ad alte velocità.

Le frequenze caratteristiche meccaniche individuate negli spettri hanno ampiezza predominante e sono sempre presenti almeno tre armoniche superiori della frequenza BPFO (vedi figure 6.11 e 6.12).

In tutte le configurazioni di prova si sono avuti esiti positivi sia dall'accelerometro verticale che da quello orizzontale.

La tecnica EMD seguita da SK porta alle stesse conclusioni: le frequenze relative al danneggiamento vengono similmente individuate, con l'aggiunta di una maggiore pulizia del segnale (vedi figure 6.13 e 6.14).

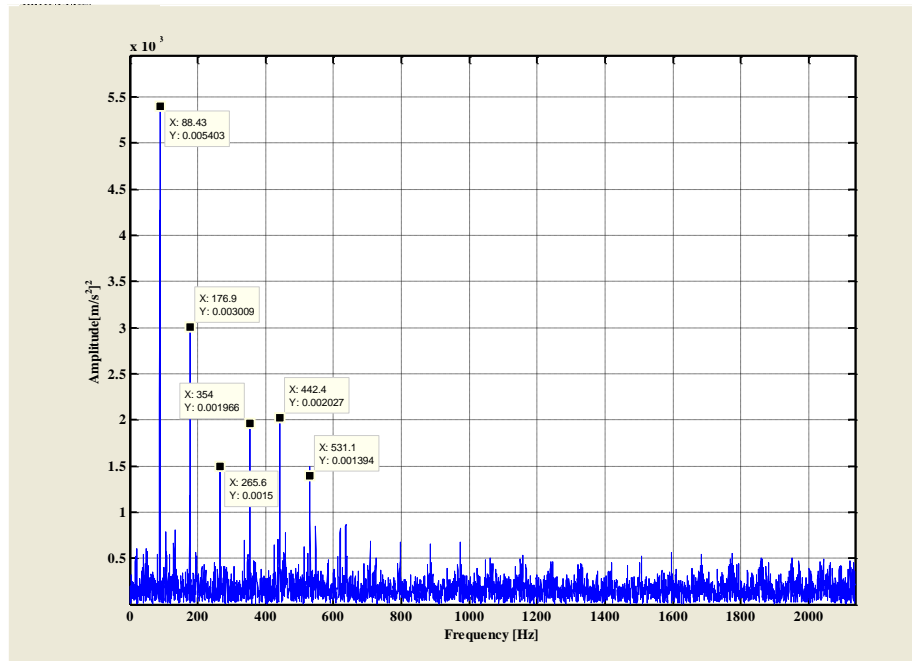


Figura 6.11 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.

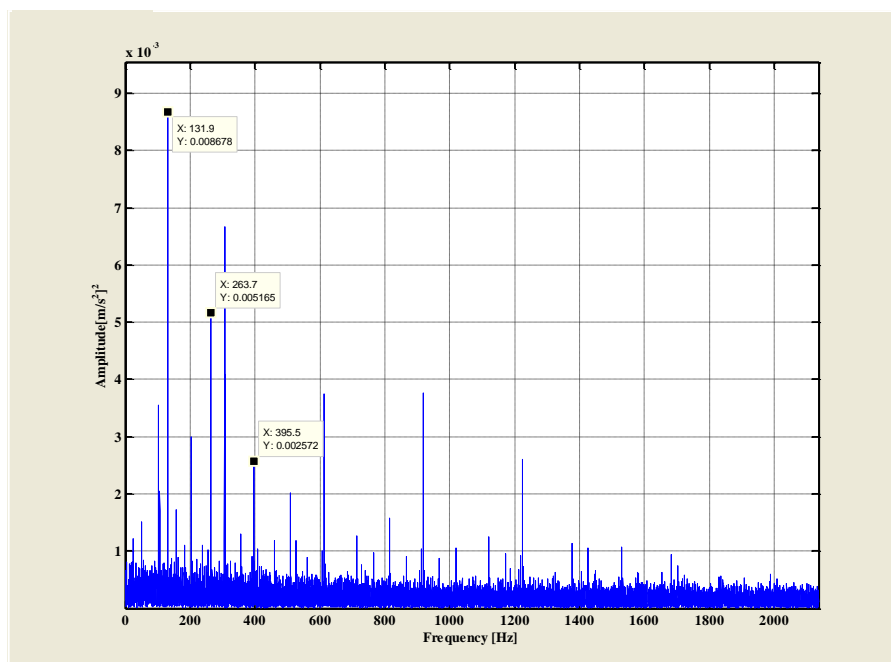


Figura 6.12 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

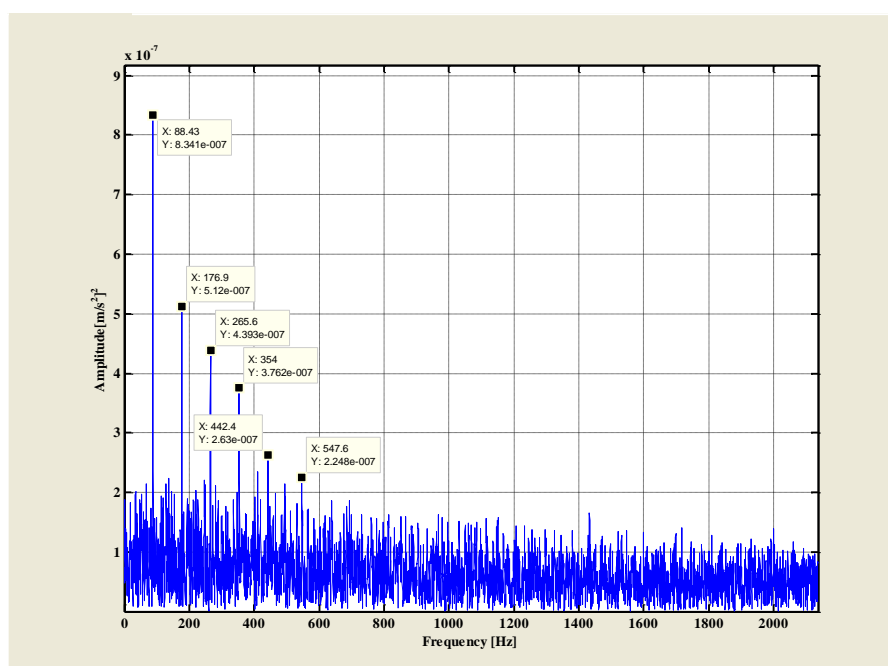


Figura 6.13 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



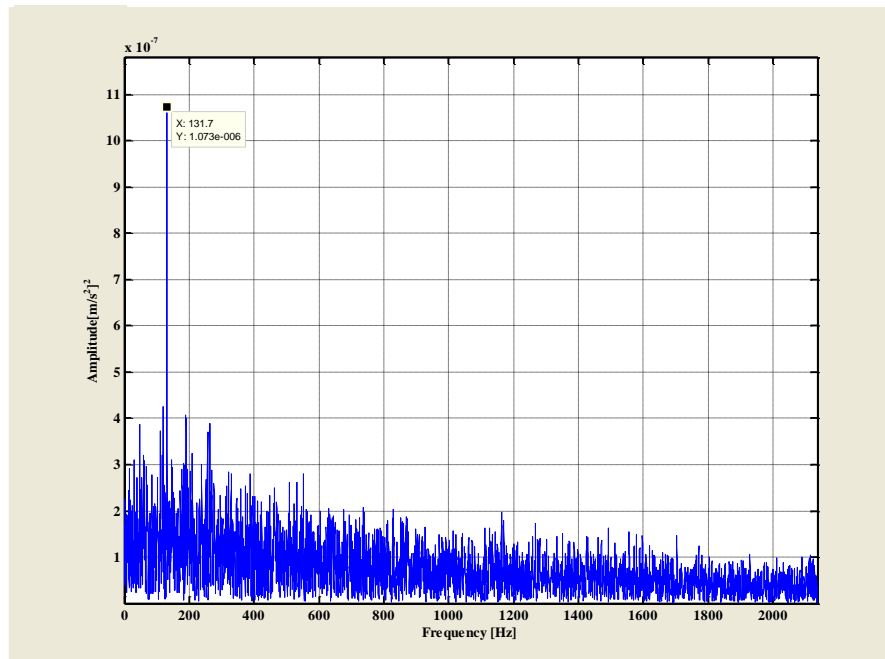


Figura 6.14 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 3) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

### 6.1.3. Difetto sulla pista esterna: test 3

In questo test sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento sulla pista esterna di media entità.

L'analisi dei dati di vibrazione suggerisce la presenza del difetto: l'individuazione è maggiore alle alte velocità piuttosto che alle basse.

Con entrambe le tecniche è possibile individuare con certezza il difetto: la frequenza caratteristica BPFO è sempre presente (vedi figure 6.15 e 6.16).

La tecnica EMD + SK permette di limitare l'ampiezza delle componenti elettriche e quelle relative alla rotazione del motore e dell'utilizzatore.

In tutte le configurazioni di prova si sono avuti esiti positivi sia dall'accelerometro verticale che da quello orizzontale.

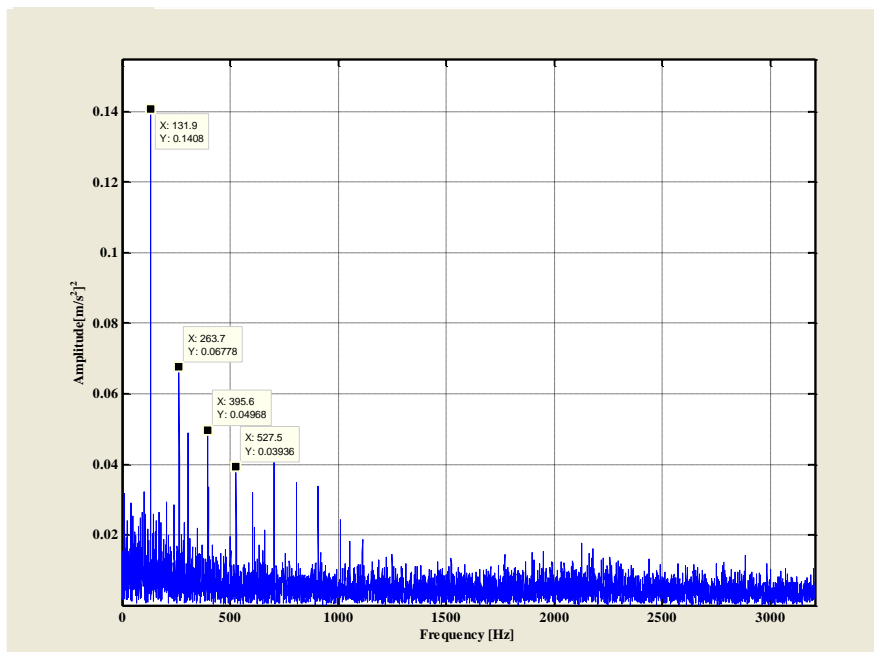


Figura 6.15 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

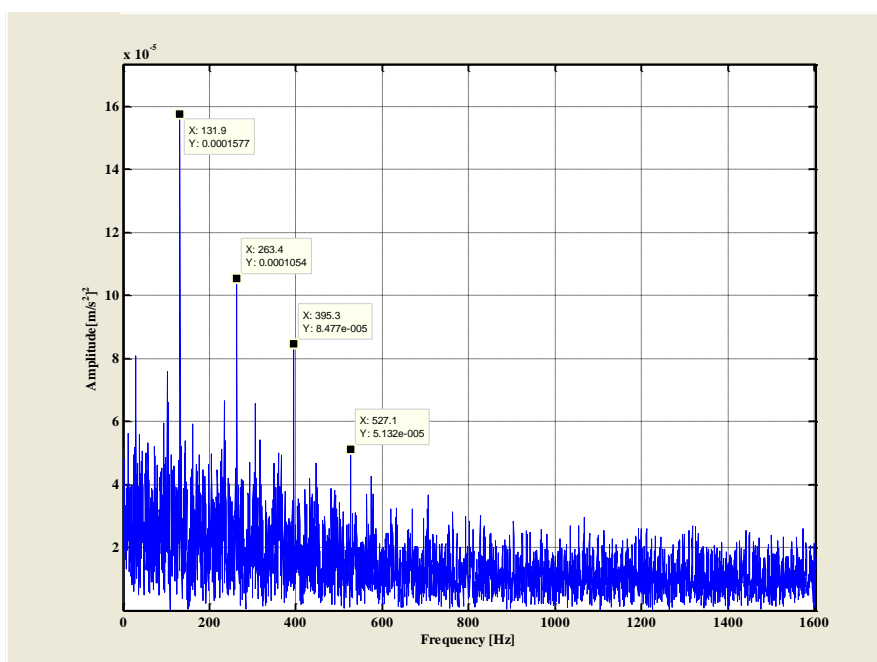


Figura 6.16 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

#### 6.1.4. Difetto sulla pista interna: test 4

In questo test, sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento sulla pista interna di piccola entità.

L'applicazione della SK permette di individuare correttamente, anche se non chiaramente, il difetto sia a bassa che ad alta velocità (vedi figura 6.17).

La tecnica EMD seguita da SK invece non permette l'individuazione del difetto (vedi figura 6.18).

Negli spettri analizzati sono sempre presenti la frequenza elettrica di alimentazione e le sue armoniche superiori con ampiezze predominanti sul resto del segnale.

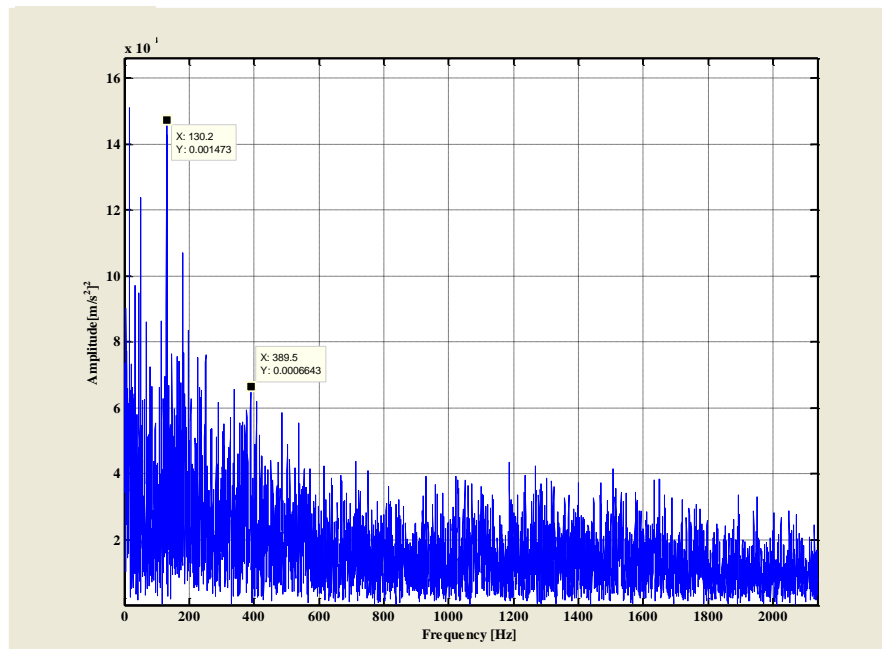
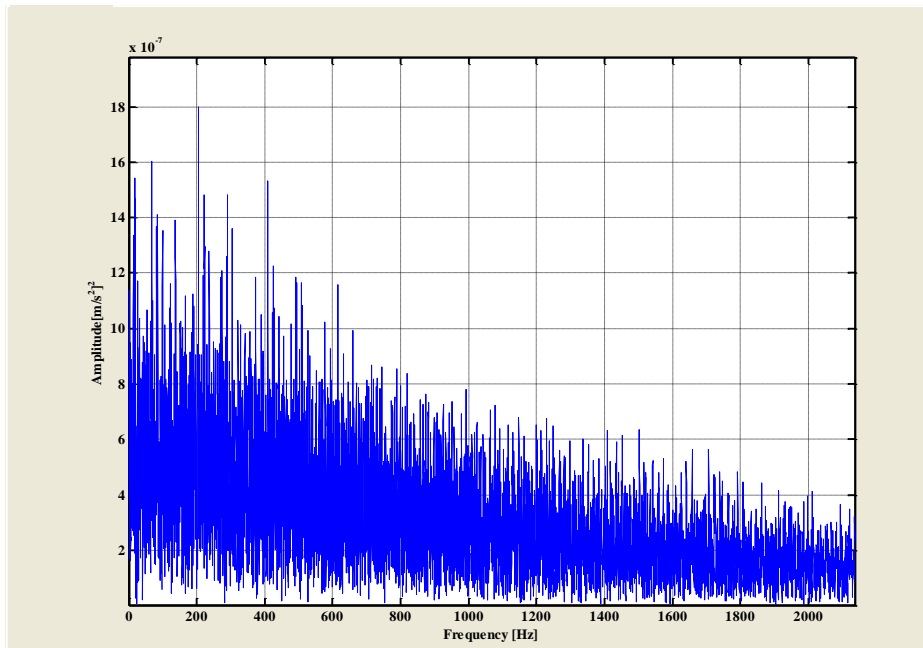


Figura 6.17 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.18** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.

### 6.1.5. Difetto sulla pista interna: test 5

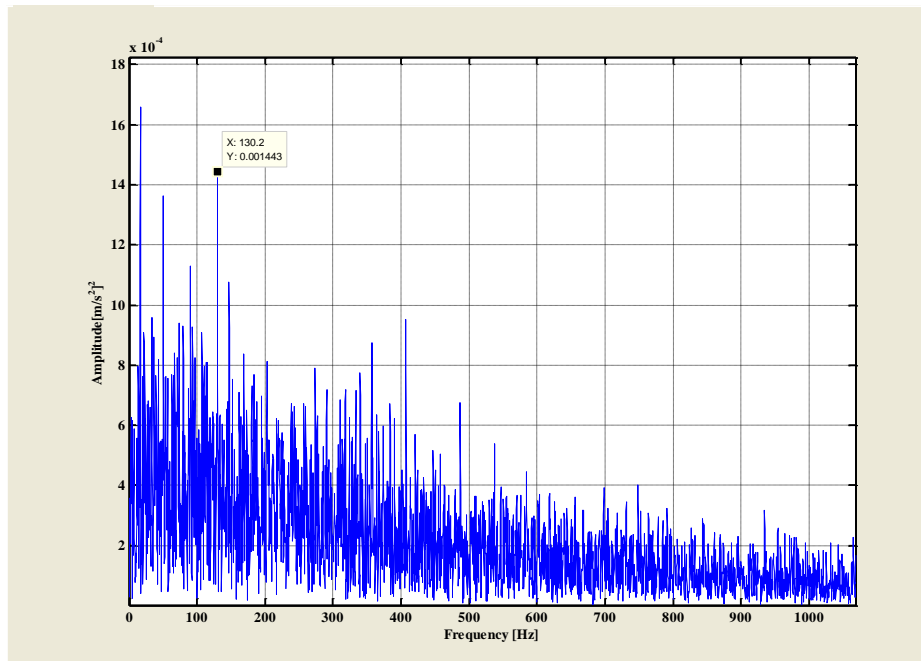
In questo test, sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento sulla pista interna di media entità.

Applicando la tecnica SK sui segnali provenienti dagli accelerometri è possibile individuare la frequenza tipica del difetto a tutte le velocità testate.

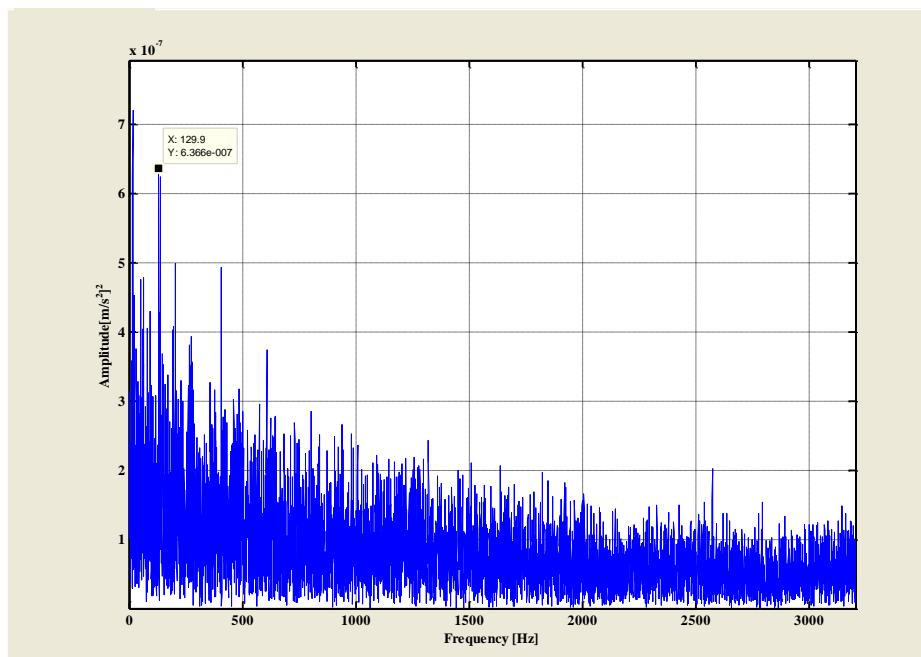
La pulizia degli spettri non è però elevata rendendo difficile l'individuazione delle frequenze (vedi figura 6.19).

A differenza del test 4, la tecnica EMD seguita da SK permette anch'essa di individuare il difetto: la decomposizione EMD però non aiuta nella pulizia del segnale e l'individuazione delle frequenze caratteristiche risulta anche in questo caso difficoltosa (vedi figura 6.20).

Le frequenze predominanti negli spettri sono sempre riconducibili all'alimentazione elettrica o alla rotazione del motore e dell'utilizzatore.



**Figura 6.19** Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.20** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.

### 6.1.6. Difetto sull'elemento volvente: test 6

In questo test, sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento di piccola entità su di un elemento volvente.

Applicando la tecnica SK sui segnali provenienti dagli accelerometri è possibile individuare la frequenza tipica del difetto (vedi figura 6.21).

Preme sottolineare che sono state individuate anche le armoniche 0,5x e 1,5x della frequenza tipica del difetto: ciò può essere ascritto al fatto che l'elemento volvente strisci invece che ruotare per una porzione di giro completo.

Anche la tecnica EMD seguita da SK permette di individuare la frequenza tipica del difetto e le sue armoniche (vedi figura 6.22).

Anche in questo caso sono state rintracciate le frequenze 0,5x e 1,5x della frequenza caratteristica del difetto.

L'ampiezza delle componenti relative al difetto è sempre predominante sul resto dello spettro.

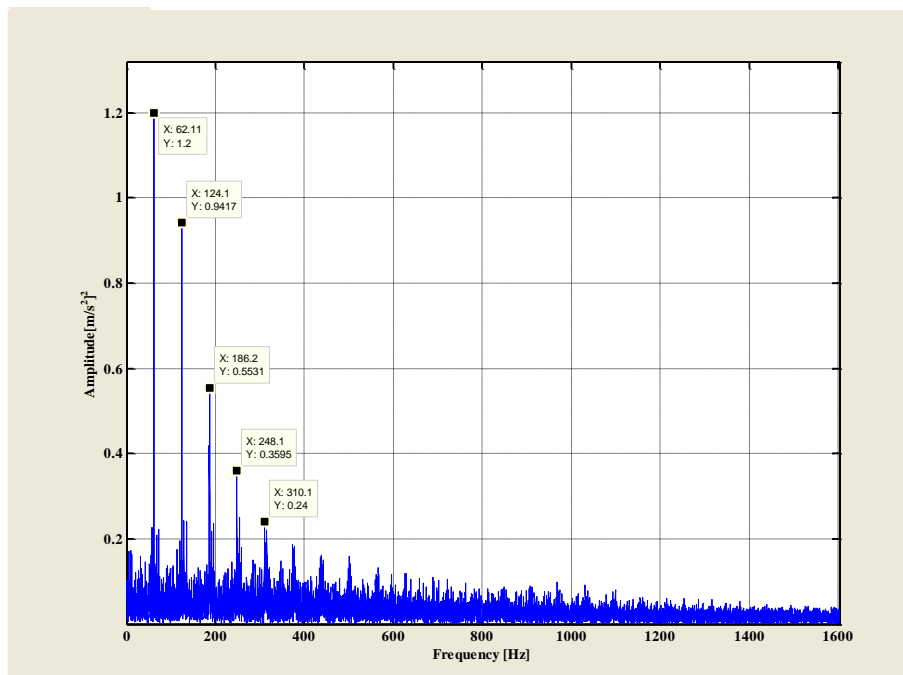


Figura 6.21 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

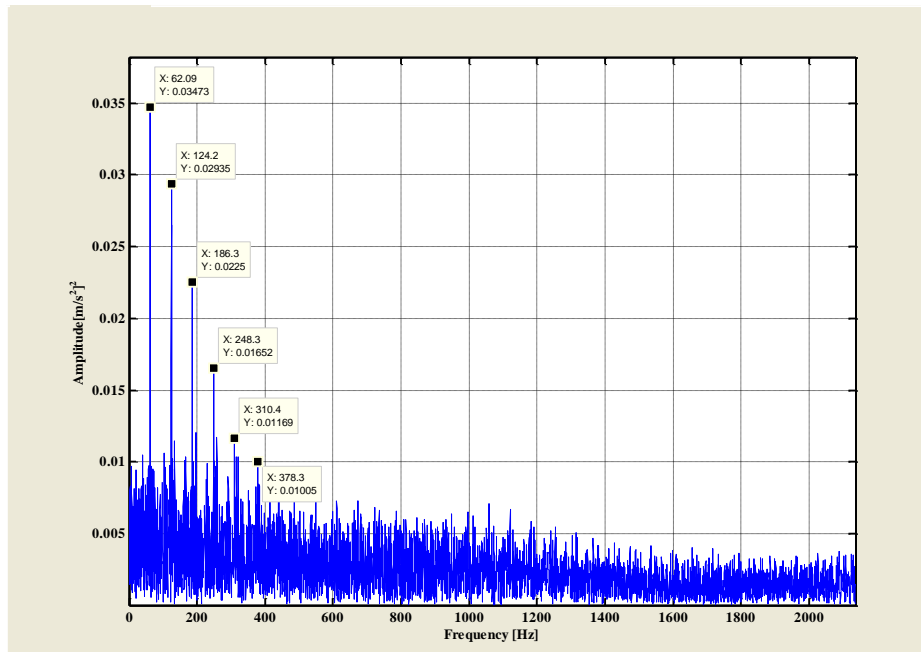


Figura 6.22 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

### 6.1.7. Difetto sugli elementi volventi: test 7

In questo test, sul motore viene montato il cuscinetto anteriore (lato riduttore) recante un danneggiamento di piccola entità su 3 elementi volventi posti in posizioni vicine nella gabbia.

In questo test valgono tutte le considerazioni fatte per i test 5 e 6 (vedi paragrafi 6.1.5 e 6.1.6): entrambe le tecniche permettono di identificare la frequenza caratteristica del difetto e le armoniche superiori. Sono inoltre presenti anche le armoniche 0,5xBSF (vedi figure 6.23 e 6.24).

L'ampiezza delle componenti relative al difetto è sempre predominante sul resto dello spettro.

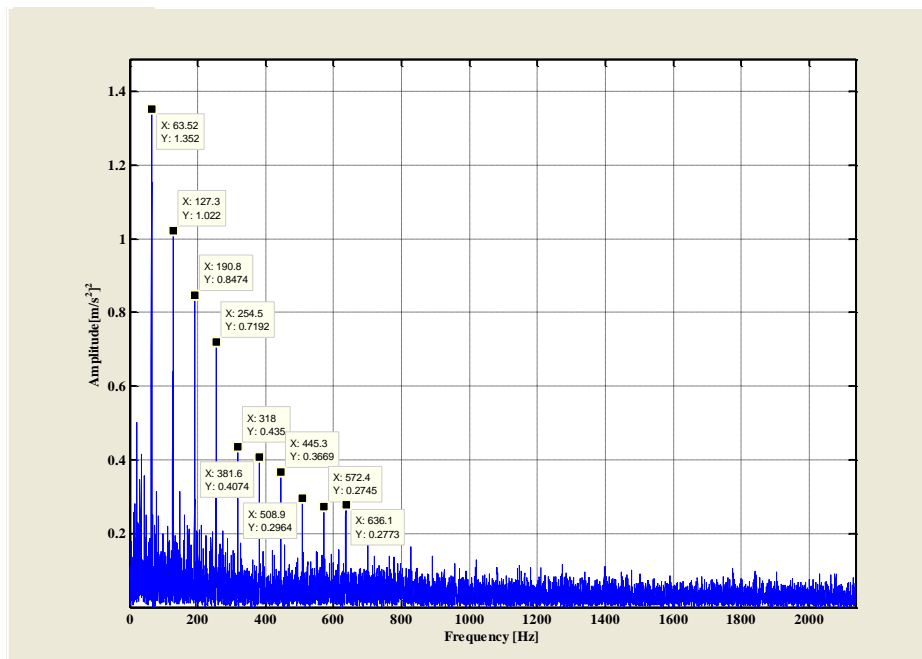


Figura 6.23 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

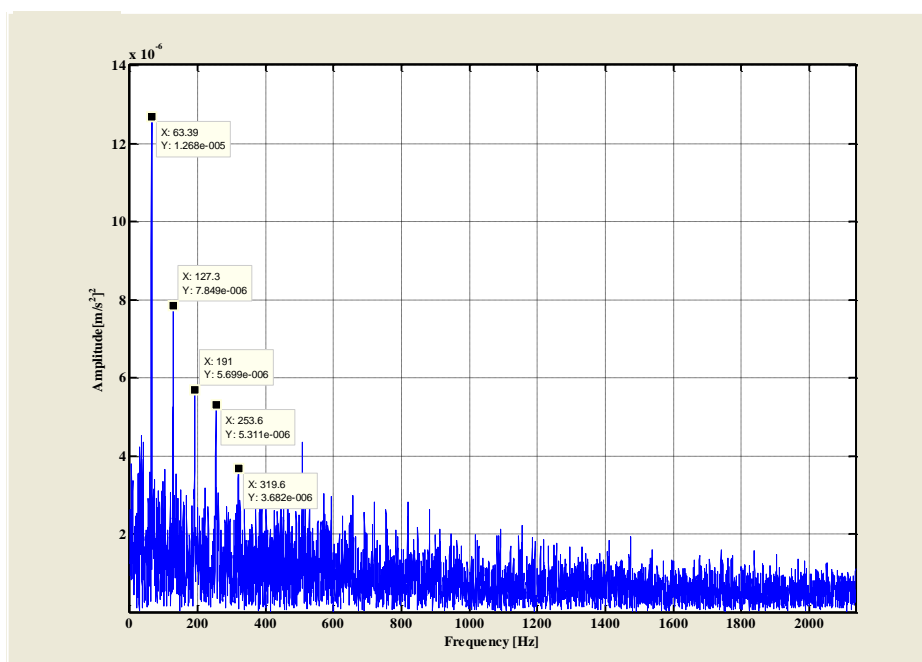


Figura 6.24 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.



### 6.1.8. Difetti su entrambi i cuscinetti: test 8

In questo test, sul motore vengono montati due cuscinetti danneggiati: il cuscinetto anteriore (lato riduttore) reca un danneggiamento di medie dimensioni sulla pista interna, il cuscinetto posteriore reca un danneggiamento di medie dimensioni sulla pista esterna.

Applicando la tecnica SK l'individuazione delle frequenze caratteristiche dei difetti risulta difficile: solo ad alta velocità è stato possibile individuare la presenza del danneggiamento sulla pista interna del cuscinetto posteriore dai segnali di vibrazione. Il danneggiamento sul cuscinetto anteriore non è mai stato diagnosticato (vedi figura 6.25).

La tecnica EMD + SK non ha dato, in alcun caso, esito positivo.

Le frequenze visibili nello spettro sono tutte riconducibili alla rotazione del motore e all'alimentazione elettrica di quest'ultimo.

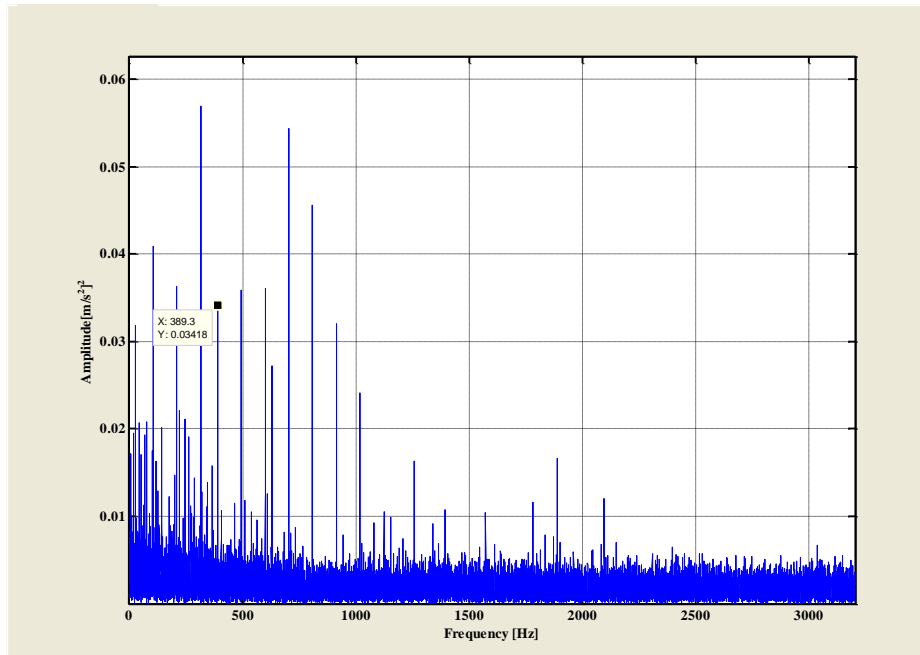


Figura 6.25 Risultati ottenuti mediante SK per il segnale di vibrazione acquisito dall'accelerometro in direzione verticale, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

### 6.1.9. Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di vibrazione

Come già evidenziato nel caso dell'analisi dei dati provenienti dal banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità, la *Spectral Kurtosis*, applicata a segnali di vibrazione, restituisce esito positivo: essa è in grado di identificare tutti i difetti, sia di piccola che di media entità.

La *Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Spectral Kurtosis* ha restituito anch'essa un buon risultato: solo in due casi, e precisamente nel test 4 e nel test 8, non ha permesso di diagnosticare il difetto. Si sottolinea inoltre che gli spettri restituiti da quest'ultima tecnica hanno una pulizia maggiore rispetto a quelli restituiti dalla *Spectral Kurtosis*, con l'esaltazione in quasi tutti i casi delle frequenze caratteristiche dei difetti.

Di contro, risulta più dispendiosa in termini di programmazione e costo computazionale.

In tabella 6.1 vengono riportati i risultati ottenuti analizzando i segnali di vibrazione provenienti dal banco prova da laboratorio.

Tabella 6.1 Tabella sintetica dei risultati ottenuti sui dati di vibrazione.

TEST	SK	EMD + SK
1	/	/
2	✓	✓
3	✓	✓
4	✓	✗
5	✓	✓
6	✓	✓
7	✓	✓
8	✓	✗

## 6.2. Analisi dei dati di tensione e di corrente

Sfruttando lo stesso programma di cui al paragrafo 4.2, ai dati di tensione e corrente viene applicata l'*Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Spectral Kurtosis* sulle singole *Intrinsic Mode Functions*.

Questa scelta è dettata dal fatto che nell'analisi dei dati provenienti dal banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità questa è la tecnica che ha mostrato maggiore efficacia diagnostica rispetto alle altre testate (vedi paragrafo 4.2).

Come già sottolineato in precedenza i risultati ottenuti sulla base dei segnali di vibrazione vengono considerati uno strumento di confronto.

Preme ancora una volta sottolineare che nelle misure di tensione sono state ricercate ed eventualmente individuate le stesse frequenze caratteristiche che sono state definite per i segnali di corrente in quanto in bibliografia non sono presenti informazioni relative alla diagnostica di cuscinetti volventi sfruttando questo tipo di segnali.

Vengono riportati di seguito i risultati per ciascuno dei test effettuati divisi per misure di tensione o di corrente.

Per quanto riguarda la procedura di analisi applicata si faccia riferimento al paragrafo 5.3.

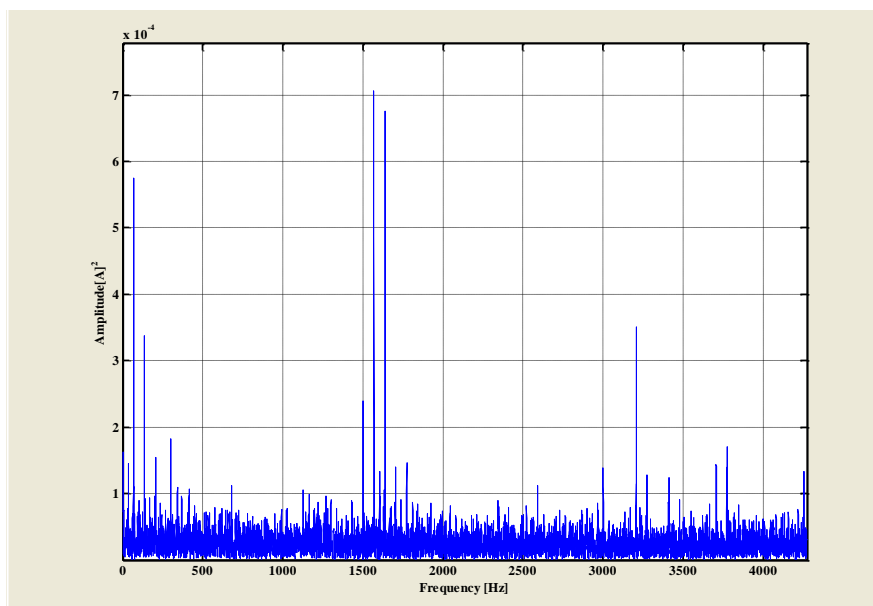
### 6.2.1. Test di riferimento: test 1

In questo test sono montati due cuscinetti integri ed è utilizzato come test di riferimento.

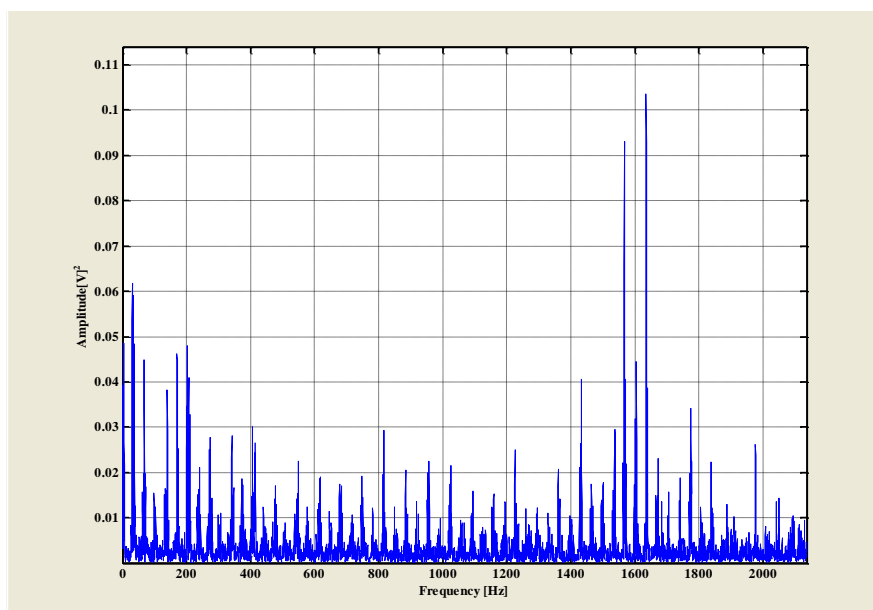
L'analisi dello spettro del segnale della corrente mette in luce le frequenze tipiche di funzionamento del motore: la frequenza di rotazione con le sue armoniche superiori e la frequenza di alimentazione con le sue armoniche superiori. Sono sempre presenti, a qualsiasi velocità analizzata, picchi a 300 Hz e 1600 Hz: sono tutti multipli interi della frequenza di rete 50 Hz e non cambiano al variare della velocità del motore, si può quindi escludere che siano legati ad un fenomeno meccanico.

L'analisi dello spettro del segnale della tensione mostra anch'esso le frequenze tipiche elettriche di funzionamento del motore.

Non sono presenti frequenze meccaniche di rotazione del motore o dell'utilizzatore (vedi figure da 6.26 a 6.33).



**Figura 6.26 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35%.**



**Figura 6.27 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 35%.**

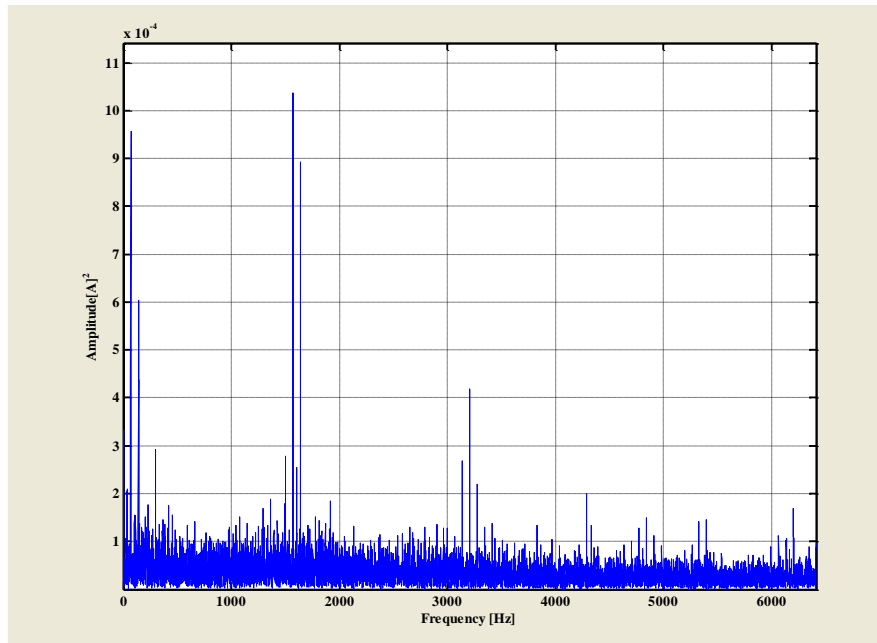


Figura 6.28 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70%.

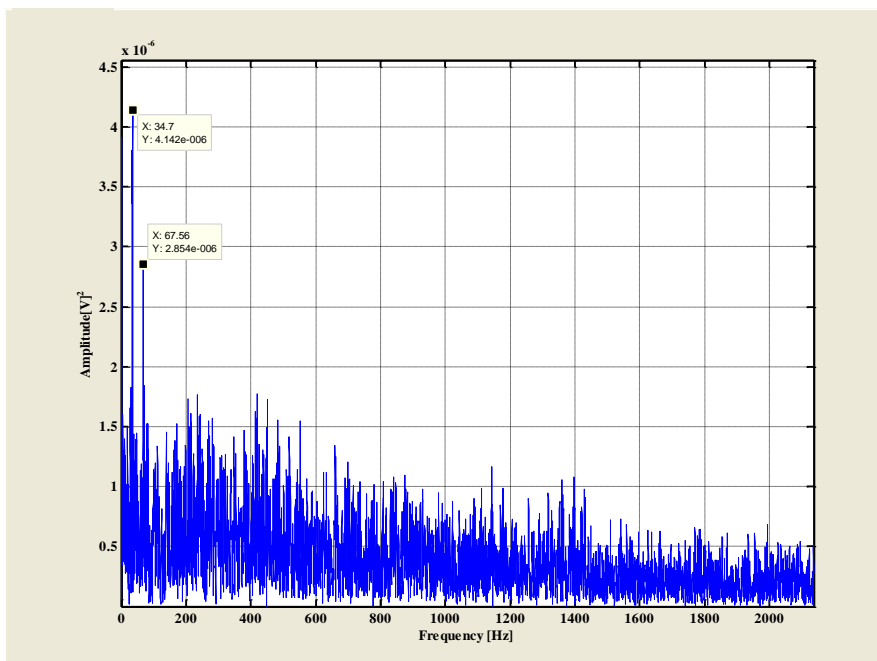
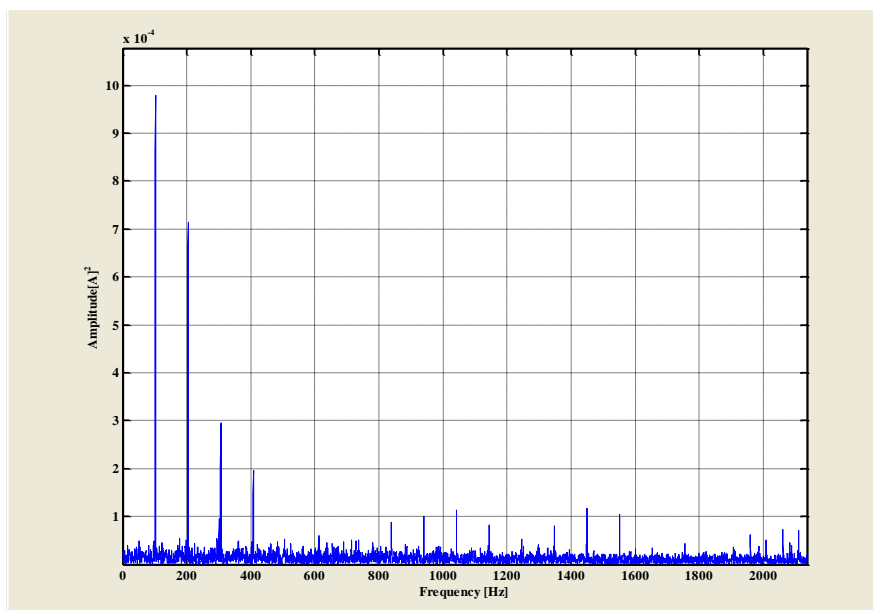
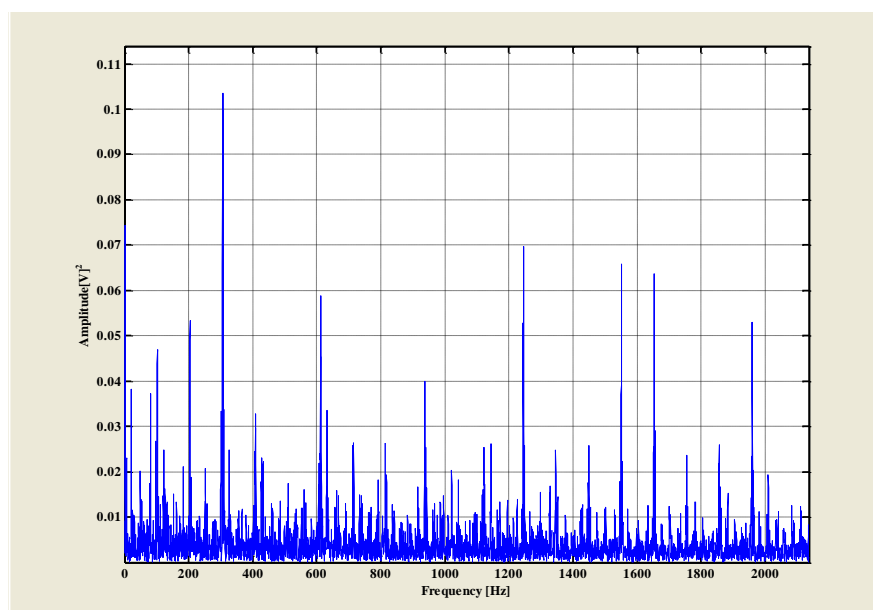


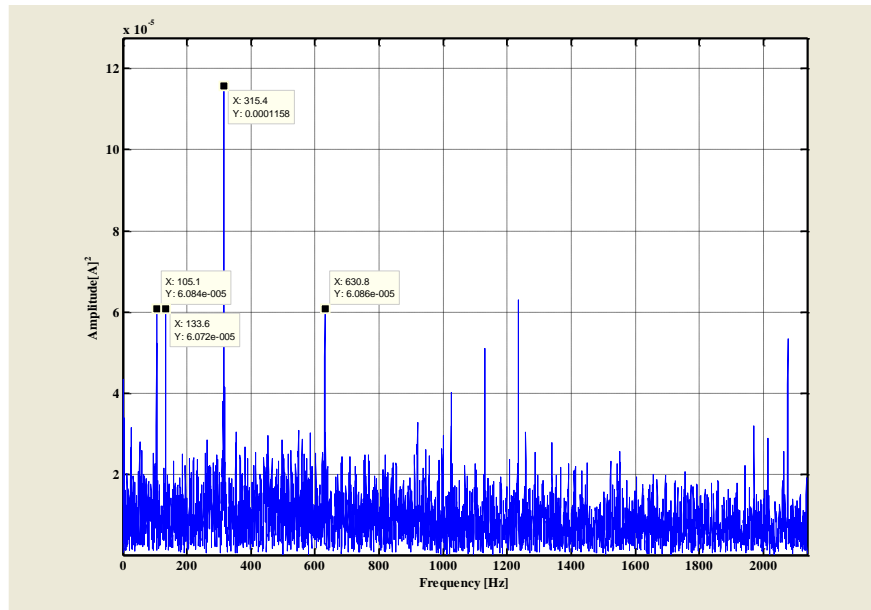
Figura 6.29 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 70%.



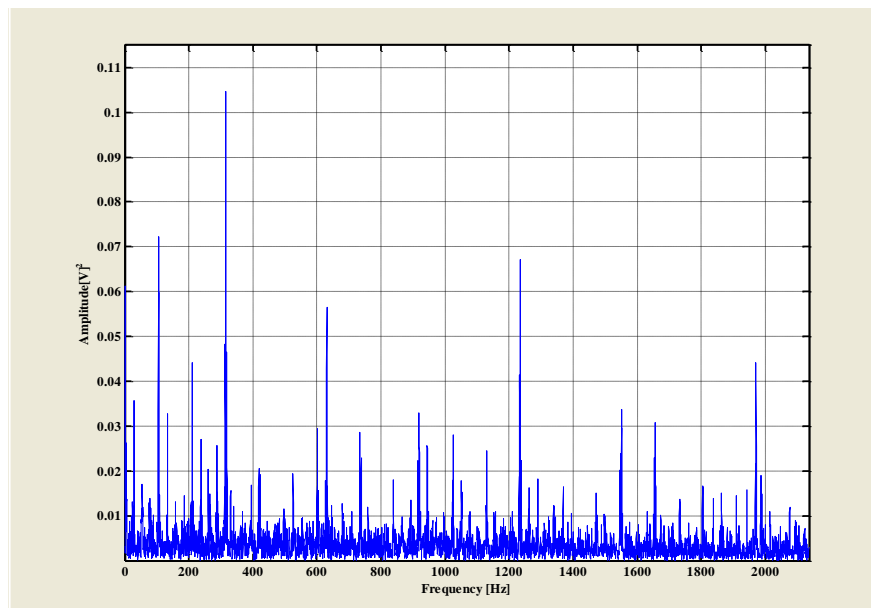
**Figura 6.30** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35%.



**Figura 6.31** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 35%.



**Figura 6.32 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70%.**



**Figura 6.33 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.**

### 6.2.2. Difetto sulla pista esterna: test 2

Applicando la tecnica EMD seguita da SK al segnale di corrente non si è ottenuto alcun risultato positivo: infatti non è stato possibile individuare, in nessuna configurazione di prova, una o più frequenze caratteristiche del difetto. Questo risultato può essere dovuto alle dimensioni contenute del difetto: infatti si ha una variazione della corrente circolante negli avvolgimenti se esiste una variazione del *gap* presente fra rotore e statore. Essendo il difetto localizzato e di contenute dimensioni, probabilmente non permette una variazione sufficiente del *gap* dato in sede di costruzione del motore.

I picchi a più elevata ampiezza sono riconducibili a frequenze multiple della rotazione del motore; è necessario precisare che le frequenze individuate non coincidono perfettamente con quelle calcolate analiticamente a causa di due motivi: la non perfetta coincidenza fra la velocità di rotazione imposta e quella reale (ordine di grandezza 2-3%) e lo spostamento in frequenza delle armoniche dovuto alla tecnica di analisi applicata (vedi figura 6.34).

L'analisi del segnale di tensione non ha prodotto risultati positivi (vedi figura 6.35).

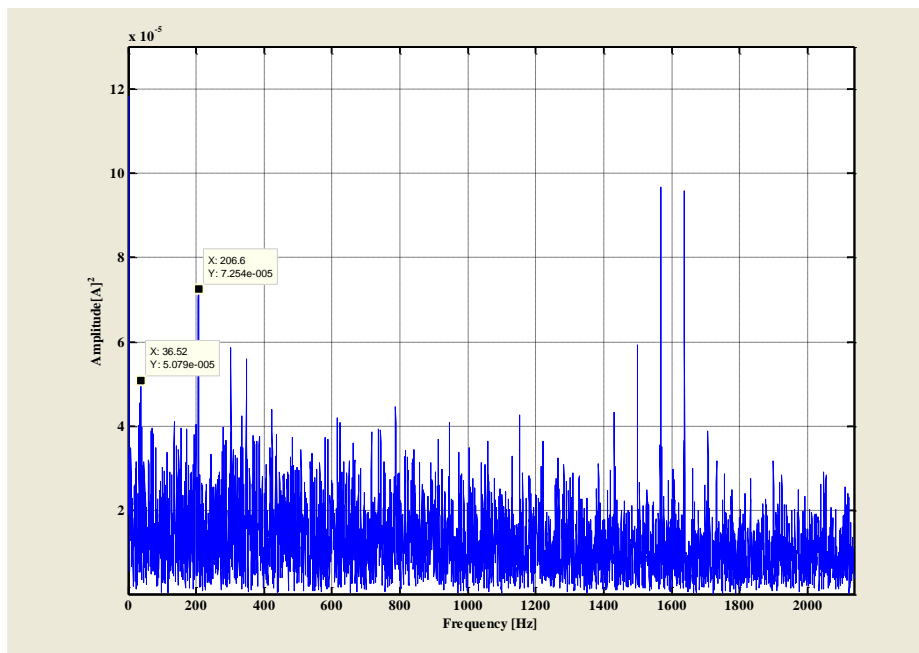


Figura 6.34 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.



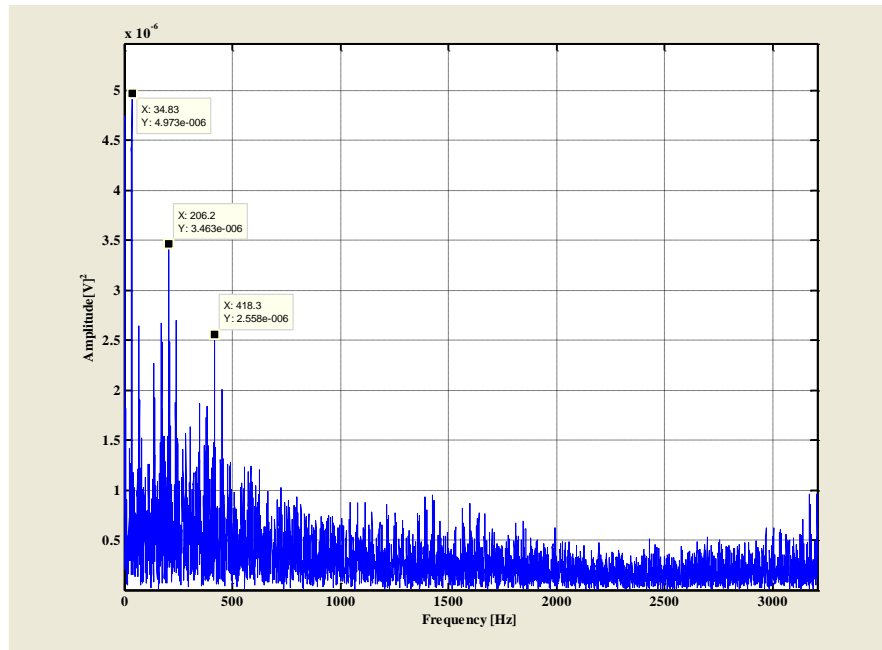


Figura 6.35 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di tensione, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.

### 6.2.3. Difetto sulla pista esterna: test 3

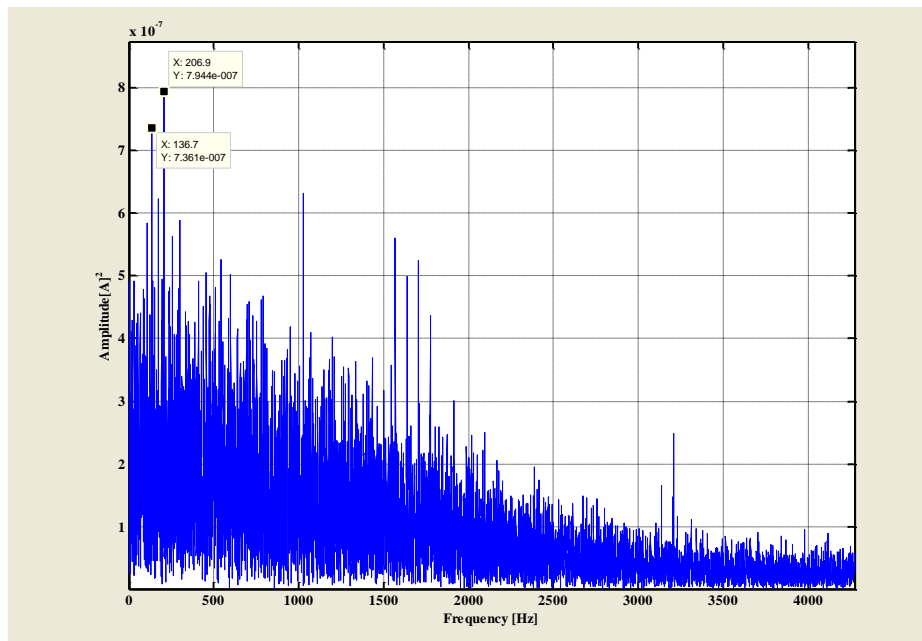
In questo test è stato realizzato un difetto sulla pista esterna di dimensioni maggiori rispetto al test precedente (ampiezza circa  $30^\circ$  e profondità circa 0,1 mm), in modo tale da distribuirlo su di un settore così da permettere una variazione sufficiente del *gap* fra rotore e statore.

Nonostante ciò non sono state individuate frequenze caratteristiche del difetto (vedi figure 6.36 e 6.37).

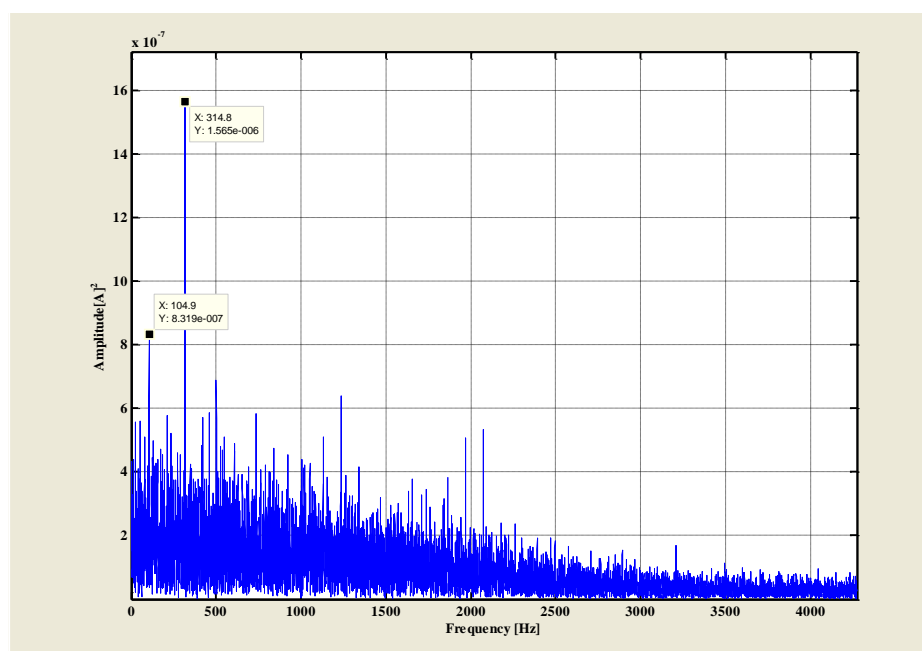
Nei segnali di corrente i picchi ad ampiezza maggiore sono riconducibili alla rotazione del motore o dell'utilizzatore ed a loro multipli.

La principale causa potrebbe essere dovuta alla non sensibile variazione del *gap*. Questo porterebbe a pensare che un difetto di dimensioni ancora maggiori possa essere identificato dalla tecnica; ciò però va contro la reale utilità di una tecnica diagnostica che dovrebbe essere in grado di individuare un difetto prima che il cuscinetto diventi inservibile: con il danneggiamento arrecato in questo test, il motore risultava già molto rumoroso e, per individuare la causa, in ambito industriale sarebbero già stati sufficienti esperienza e buon senso.

Il segnale di tensione contiene componenti puramente elettriche (vedi figura 6.38).



**Figura 6.36** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.



**Figura 6.37** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

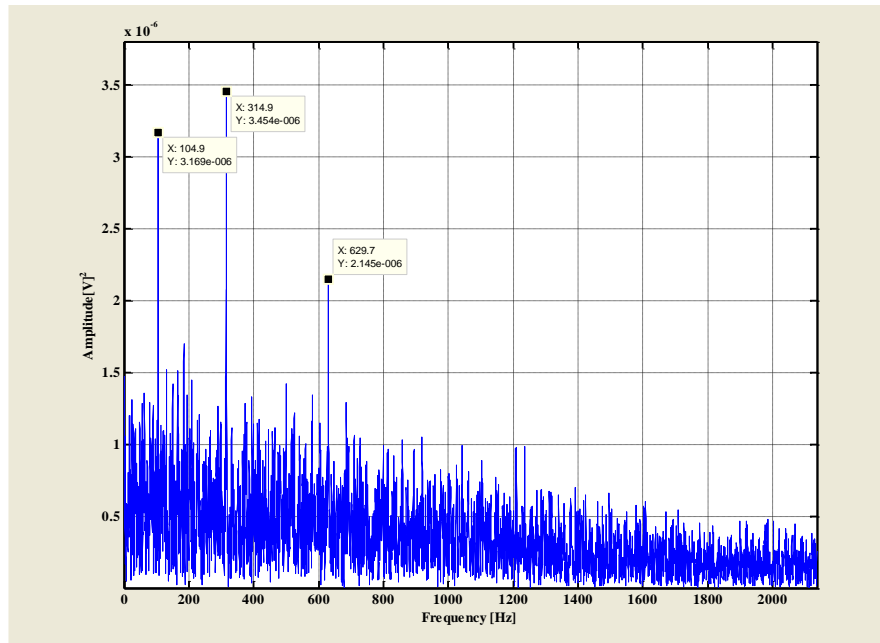


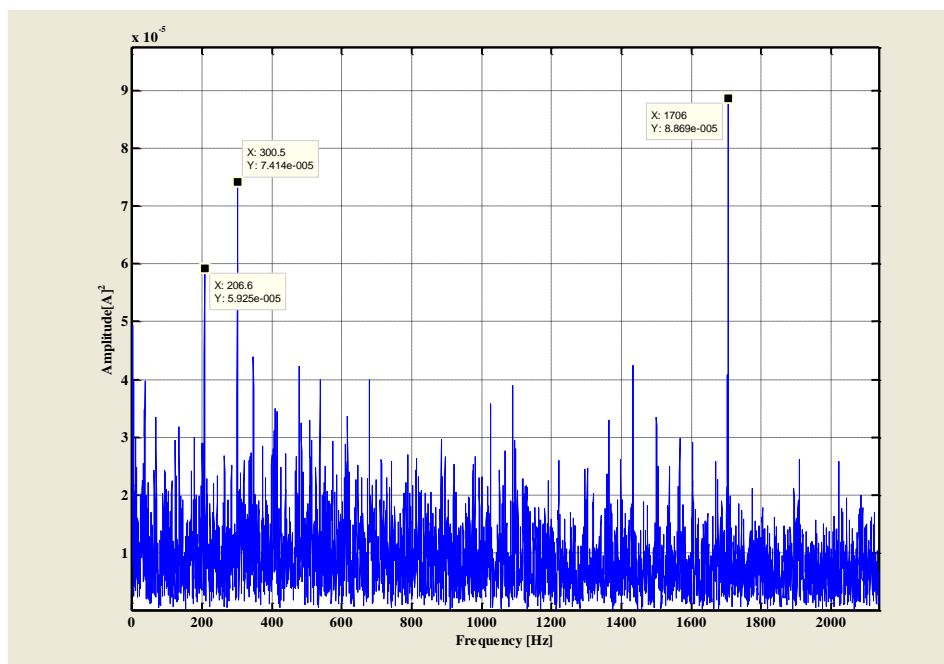
Figura 6.38 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 3) per il segnale di tensione, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

#### 6.2.4. Difetto sulla pista interna: test 4

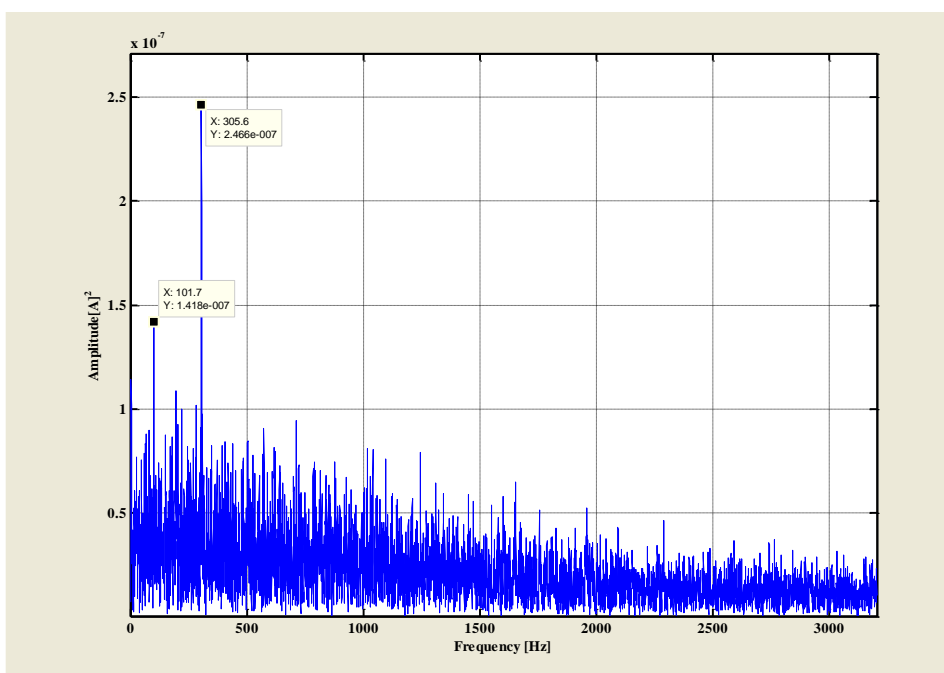
Questo test riguarda un cuscinetto con un difetto localizzato di piccole dimensioni sulla pista interna.

Nei segnali di corrente la tecnica non ha permesso di individuare in nessun caso il difetto, restituendo spettri contenenti le armoniche della frequenza di rotazione del motore e altre componenti che possono essere ricondotte alla frequenza di alimentazione dell'inverter (vedi figure 6.39 e 6.40).

Il segnale di tensione ha prodotto gli stessi risultati (da questo punto in poi non vengono più riportati grafici riguardanti lo spettro del segnale della tensione in quanto del tutto simili a quelli precedenti).



**Figura 6.39 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.**



**Figura 6.40 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.**

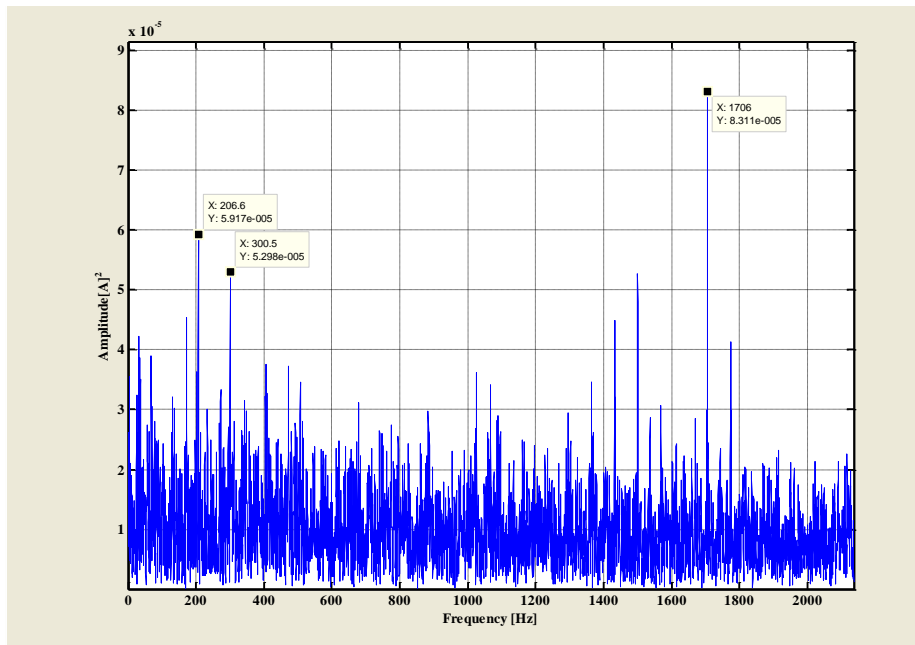
### 6.2.5. Difetto sulla pista interna: test 5

Come nel caso di danneggiamento della pista esterna, anche in questo test si è provocato un danneggiamento di maggiore estensione sulla pista interna per incrementare la variazione del *gap* fra rotore e statore.

Come nel test precedente però, nei segnali di corrente la tecnica non è stata in grado di individuare in nessun caso il difetto.

Gli spettri contengono solamente le armoniche della frequenza di rotazione del motore e le armoniche di natura elettrica (vedi figure 6.41 e 6.42).

Similmente anche il segnale di tensione ha restituito spettri contenenti le componenti elettriche.



**Figura 6.41 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.**

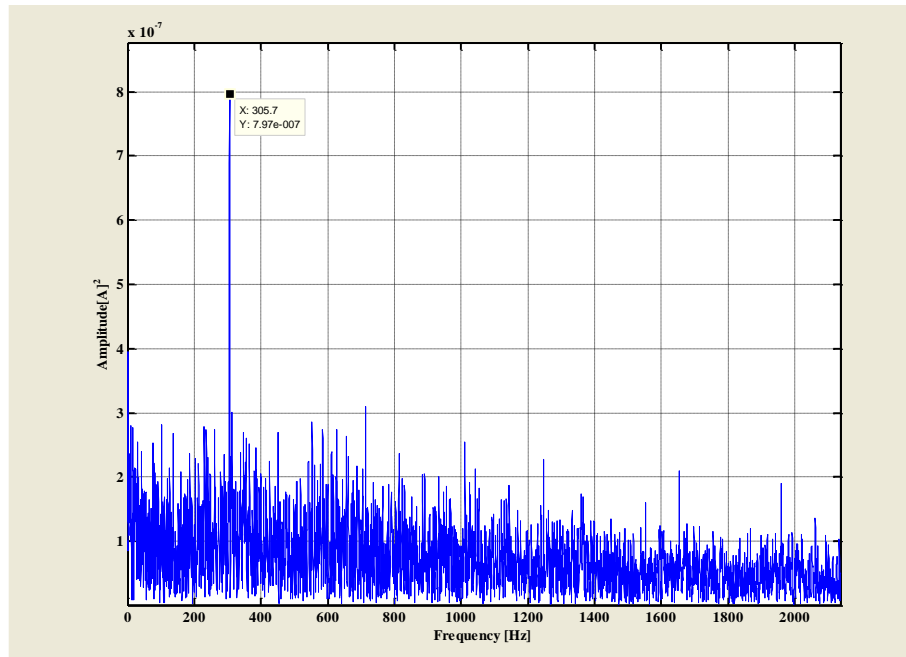
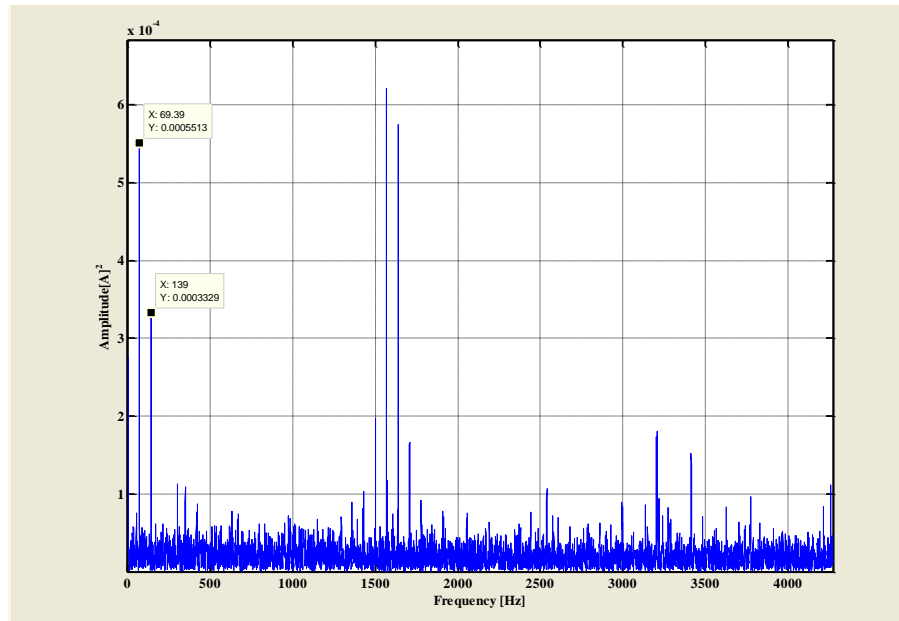


Figura 6.42 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.

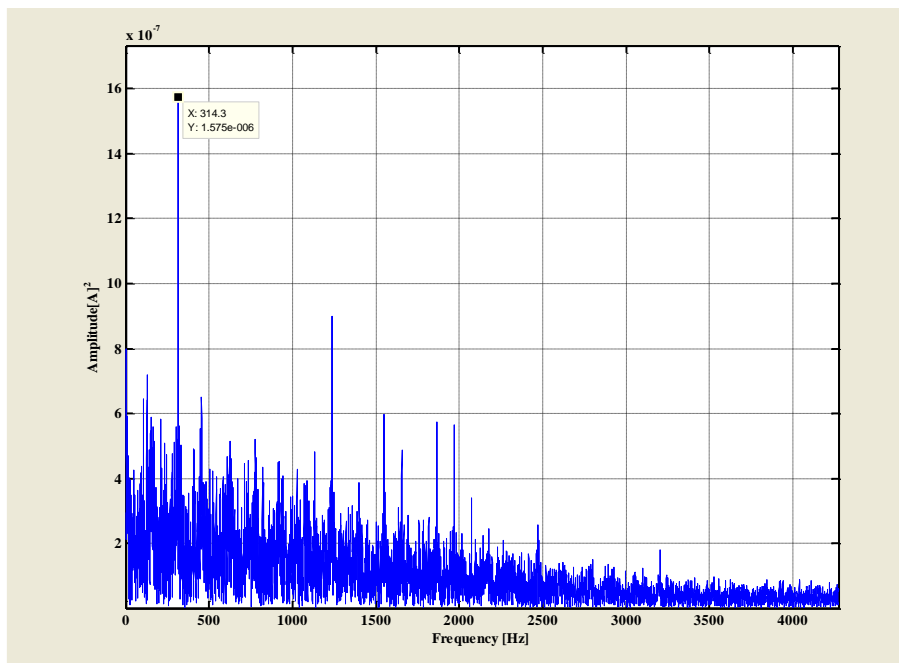
### 6.2.6. Difetto sull'elemento volvente: test 6

In questo test il cuscinetto ha subito un danneggiamento di piccole dimensioni su di un elemento volvente (circa 0,08 mm di materiale asportato sul diametro del rullo).

Analizzando il segnale di corrente la tecnica ha dato risultati negativi: negli spettri sono sempre presenti le armoniche di rotazione del motore e dell'utilizzatore, le componenti elettriche di alimentazione, mentre non sono mai state individuate le frequenze caratteristiche del difetto (vedi figure 6.43 e 6.44). Questo risultato era prevedibile in quanto il danneggiamento di un solo elemento volvente non crea variazione del *gap* perché il carico viene distribuito sui rulli precedenti e successivi e non si ha apprezzabile movimento radiale del rotore. Il segnale di tensione non ha dato risultati positivi.



**Figura 6.43** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.



**Figura 6.44** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

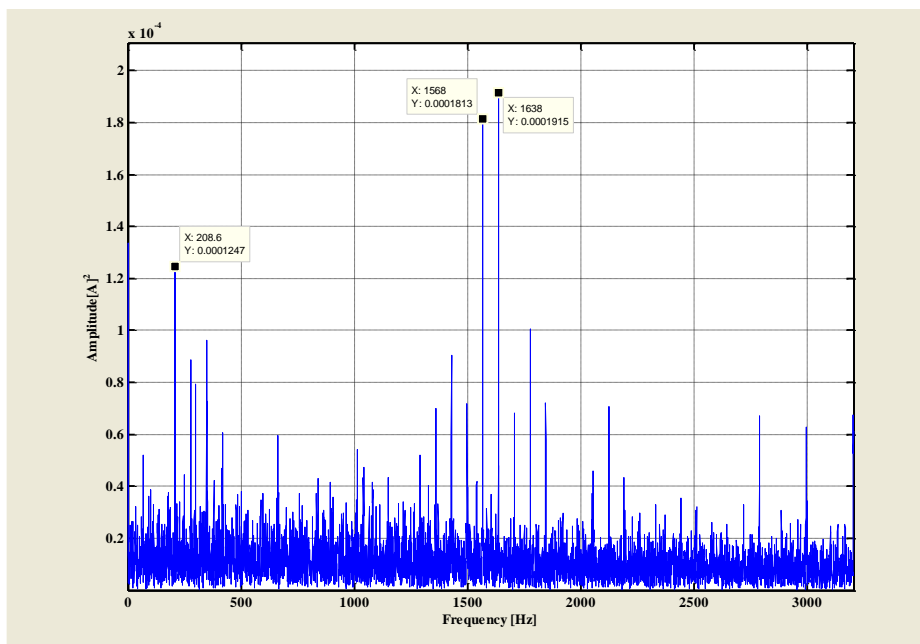
### 6.2.7. Difetto sugli elementi volventi: test 7

In questo test il cuscinetto ha subito un danneggiamento di piccole dimensioni su tre elementi volventi (circa 0,08 mm di materiale asportato sul diametro del rullo).

Questo test è stato inserito nelle prove per investigare se un danneggiamento esteso a 3 rulli consecutivi possa far variare in maniera apprezzabile il *gap* ed essere diagnosticabile attraverso l'analisi del segnale della corrente e della tensione.

Anche in questo caso si hanno risultati negativi in quanto il *gap* potrebbe non subire una variazione sensibile a causa di piccoli slittamenti dei rulli che fanno sì che i danneggiamenti non siano in fase tra di loro (vedi figura 6.45 e 6.46).

Il segnale di tensione presenta armoniche riconducibili alla frequenza di alimentazione del motore e alla rotazione dello stesso.



**Figura 6.45** Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 70 %.



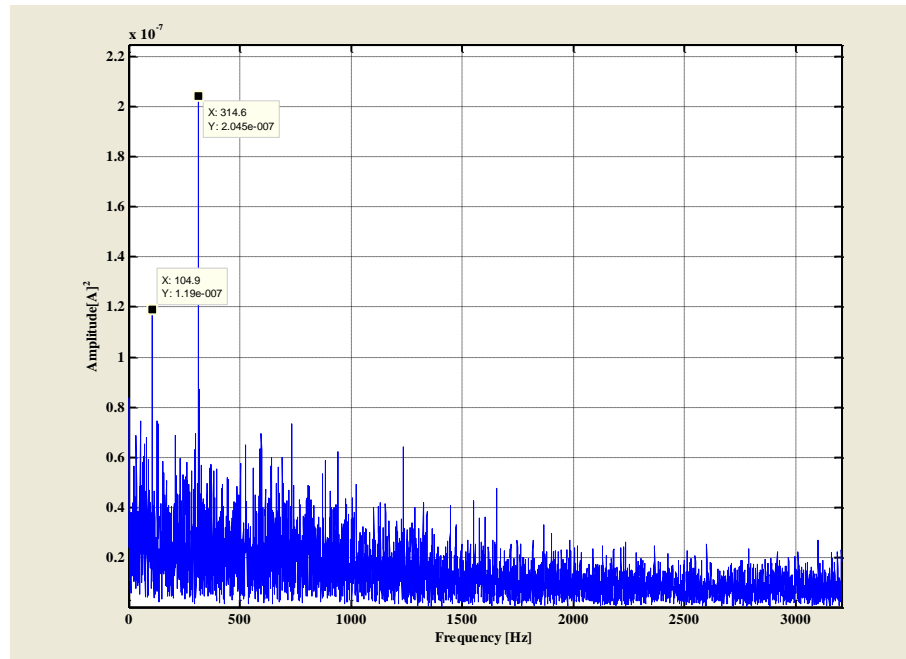


Figura 6.46 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 70 %.

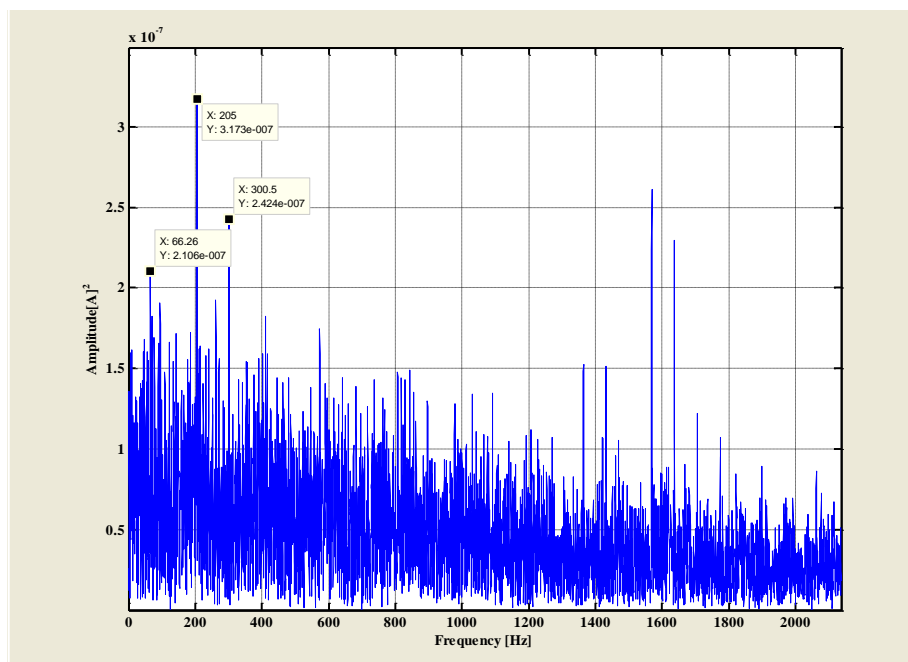
### 6.2.8. Difetti su entrambi i cuscinetti: test 8

Dati i risultati negativi finora ottenuti, si è cercato in questo test di far variare in maniera diversa il *gap* danneggiando entrambi i cuscinetti che supportano il rotore: il cuscinetto anteriore (lato riduttore) ha subito un danneggiamento sulla pista interna, mentre il cuscinetto posteriore sulla pista esterna.

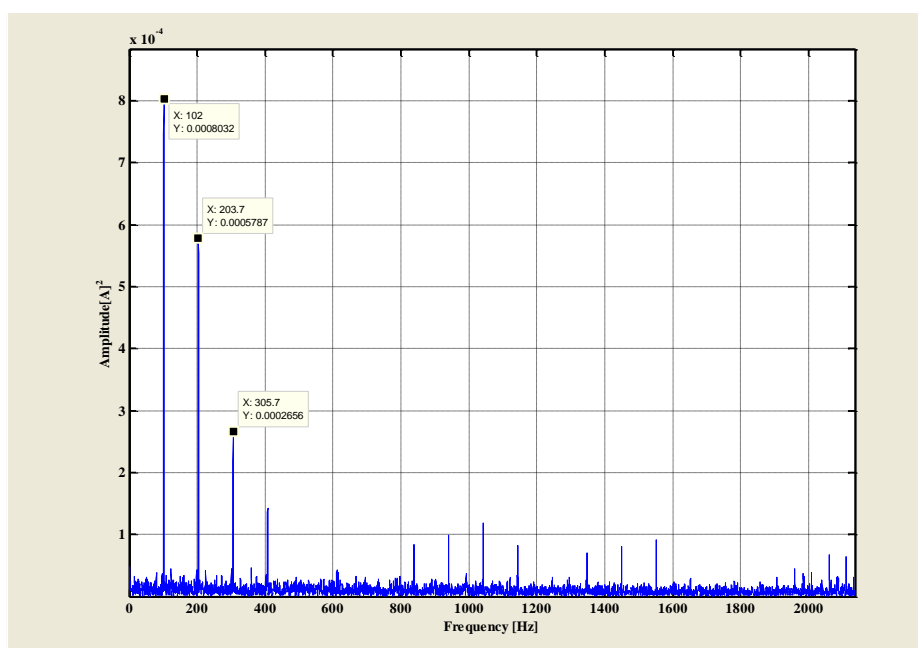
L'analisi ha però dato anche in questo caso gli stessi risultati negativi dei test precedenti: nel segnale di corrente sono presenti solamente le armoniche di rotazione del motore e dell'utilizzatore e le armoniche elettriche di alimentazione (vedi figure 6.47 e 6.48).

In nessun caso si sono identificate le frequenze caratteristiche dei due difetti, che sono stati scelti appositamente in modo da non far coincidere le frequenze caratteristiche fra di loro in quanto i due cuscinetti hanno caratteristiche geometriche molto simili.

Il segnale di tensione restituisce gli stessi risultati negativi.



**Figura 6.47 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 2) per il segnale di corrente, velocità 1000 rpm, coppia 35 %.**



**Figura 6.48 Risultati ottenuti mediante EMD + SK (IMF 1) per il segnale di corrente, velocità 1500 rpm, coppia 35 %.**

### 6.2.9. Sintesi dei risultati ottenuti sui segnali di tensione e corrente

La tecnica *Empirical Mode Decomposition* seguita da *Spectral Kurtosis*, applicata a segnali di tensione e corrente, non ha prodotto risultati positivi in nessun caso.

Ciò può essere dovuto a diversi fattori. In primo luogo i difetti realizzati, anche se in alcuni casi davvero estesi, potrebbero non portare ad avere una variazione del *gap* sufficiente per far comparire negli spettri dei segnali di corrente e di tensione le frequenze caratteristiche dei danneggiamenti.

In secondo luogo è possibile che il rotore si autocentri per inerzia durante la rotazione non andando a far variare il *gap* e quindi la corrente circolante nel motore.

In ultimo luogo, tramite l'analisi dei segnali di tensione e corrente, potrebbe non essere possibile fare diagnostica sui cuscinetti che supportano il rotore di un motore elettrico nello stato di avanzamento del danneggiamento preso in considerazione in questo lavoro (difetto sensibile ma che non pregiudica il funzionamento del motore).

In tabella 6.2 vengono riportati i risultati ottenuti analizzando i segnali di corrente e di tensione.

Tabella 6.2 Risultati dell'analisi dei segnali di corrente e tensione con la tecnica EMD + SK.

TEST	EMD + SK	
	SEGNALI DI CORRENTE	SEGNALI DI TENSIONE
1	/	/
2	×	×
3	×	×
4	×	×
5	×	×
6	×	×
7	×	×
8	×	×

### **6.3. Analisi del valore RMS dei segnali di vibrazione e di corrente**

Dati i risultati negativi ottenuti nel paragrafo 6.2, si è cercato di ottenere comunque una indicazione dal calcolo del valore RMS dei segnali di corrente: una eventuale crescita di questo valore potrebbe indicare la presenza di un malfunzionamento all'interno del motore.

E' chiaro che non sarebbe comunque possibile ottenere una informazione sulla natura del malfunzionamento: in altre parole, non si potrebbe ottenere l'informazione sulla posizione del danneggiamento.

Il calcolo è stato eseguito in funzione della coppia resistente applicata, considerando l'intera lunghezza del segnale campionato (circa 30 s) e con velocità pari a 500 rpm. Sono stati calcolati, per confronto, anche i valori RMS dei segnali di vibrazione in funzione della velocità di rotazione del motore.

In tabella 6.3 e 6.4 vengono riportati rispettivamente i valori relativi ai segnali di vibrazione e di corrente.

Si è inoltre calcolata la variazione percentuale della corrente circolante nel motore nel caso di un cuscinetto danneggiato rispetto al caso in cui sul motore siano montati cuscinetti integri (vedi tabella 6.5).

Per quanto riguarda i segnali di vibrazione si nota:

- trend crescente al crescere della velocità di rotazione;
- a bassa velocità, con eccezione dei casi riguardanti il difetto sugli elementi volventi, il valore RMS del cuscinetto integro è sempre più elevato degli altri casi;
- ad alta velocità il valore RMS del cuscinetto integro è sempre più basso rispetto a tutti i casi analizzati;
- a media velocità, in caso di difetto sulla pista interna, il valore RMS risulta minore rispetto al caso di cuscinetto integro, mentre tutti gli altri difetti presentano valori RMS superiori al valore di riferimento.

In generale quindi la crescita del valore RMS rispetto al caso di riferimento (cuscinetto integro) può indicare l'insorgenza di un comportamento del motore che si discosta da quello di normale funzionamento.

Per i segnali di corrente invece si nota un trend crescente al crescere della coppia dell'utilizzatore coerentemente con il principio di funzionamento di questo tipo di motori elettrici e, nella quasi totalità dei test, una riduzione del valore RMS della corrente circolante nel motore in presenza di cuscinetti recanti un danneggiamento, in accordo con i risultati presentati in bibliografia [22].

Anche osservando la variazione percentuale della corrente è possibile trarre medesime conclusioni.

**Tabella 6.3 Risultati del calcolo del valore RMS sui segnali di vibrazione provenienti dall'accelerometro verticale.**

Test	Tipologia di difetto	Velocità		
		500 rpm	1000 rpm	1500 rpm
1	cuscinetto integro	1.506 m/s <sup>2</sup>	3.807 m/s <sup>2</sup>	5.075 m/s <sup>2</sup>
2	pista esterna, piccole dimensioni	1.442 m/s <sup>2</sup>	3.879 m/s <sup>2</sup>	5.257 m/s <sup>2</sup>
3	pista esterna, medie dimensioni	1.439 m/s <sup>2</sup>	3.851 m/s <sup>2</sup>	5.599 m/s <sup>2</sup>
4	pista interna, piccole dimensioni	1.390 m/s <sup>2</sup>	3.578 m/s <sup>2</sup>	5.272 m/s <sup>2</sup>
5	pista interna, medie dimensioni	1.501 m/s <sup>2</sup>	3.765 m/s <sup>2</sup>	5.454 m/s <sup>2</sup>
6	1 elemento volvente	1.720 m/s <sup>2</sup>	4.552 m/s <sup>2</sup>	6.966 m/s <sup>2</sup>
7	3 elementi volventi	4.104 m/s <sup>2</sup>	8.183 m/s <sup>2</sup>	10.717 m/s <sup>2</sup>
8	doppio difetto	1.609 m/s <sup>2</sup>	3.730 m/s <sup>2</sup>	5.576 m/s <sup>2</sup>

**Tabella 6.4 Risultati del calcolo del valore RMS sui segnali di corrente.**

Test	Tipologia di difetto	Coppia	
		35%	70%
1	cuscinetto integro	0.415 A	0.543 A
2	pista esterna, piccole dimensioni	0.399 A	0.534 A
3	pista esterna, medie dimensioni	0.473 A	0.592 A
4	pista interna, piccole dimensioni	0.417 A	0.521 A
5	pista interna, medie dimensioni	0.420 A	0.519 A
6	1 elemento volvente	0.299 A	0.334 A
7	3 elementi volventi	0.324 A	0.351 A
8	doppio difetto	0.333 A	0.372 A

Tabella 6.5 Variazioni percentuali della corrente rispetto al cuscinetto integro.

Test	Tipologia di difetto	Coppia	
		35%	70%
2	pista esterna, piccole dimensioni	-4.01%	-1.69%
3	pista esterna, medie dimensioni	+12.26%	+8.28%
4	pista interna, piccole dimensioni	+0.48%	-4.22%
5	pista interna, medie dimensioni	+1.19%	-4.62%
6	1 elemento volvente	-38.80%	-62.58%
7	3 elementi volventi	-28.09%	-54.70%
8	doppio difetto	-24.63%	-45.97%

## 7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Scopo del presente lavoro di tesi è stato la diagnostica dello stato dei cuscinetti volventi mediante *signal processing* di segnali di vibrazione, tensione e corrente.

La metodologia tradizionale per la diagnostica dei cuscinetti volventi si basa sull'analisi di segnali di vibrazione provenienti da accelerometri posti sul sistema oggetto di studio.

Il tentativo è stato quello di ridurre il numero di sensori necessari e la complessità del sistema di acquisizione analizzando segnali di tensione e di corrente propri del funzionamento dei motori elettrici. Va precisato che è possibile realizzare tale approccio diagnostico solo sui cuscinetti che supportano il rotore del motore elettrico.

Nella prima parte di questo lavoro si è dimostrata l'efficienza della *Spectral Kurtosis* come strumento di diagnostica applicato a segnali di vibrazione.

Sono stati analizzati i dati provenienti da un banco prova allestito per la diagnostica dei cuscinetti del sistema di trazione di un treno ad alta velocità: su tali segnali la tecnica ha permesso di identificare nella maggior parte dei casi il difetto, pur in presenza di un elevato rumore elettrico ed ambientale (il che ne fa una tecnica particolarmente adatta ad applicazioni industriali).

I risultati sperimentali ottenuti indicano come tutte le tipologie di difetto siano identificabili. E' necessario però effettuare alcune distinzioni.

Nel caso si tratti di cuscinetti a sfere la tecnica ha dimostrato una buona efficacia diagnostica riuscendo ad identificare tutti i tipi di difetti in almeno un test. I difetti realizzati sulla pista interna sono stati quasi sempre diagnosticati, tranne nel caso di difetto di piccole dimensioni in regimi di transitorio ed elevata velocità. I difetti sulla pista esterna e sulla gabbia sono sempre diagnosticabili con chiarezza negli spettri sia a bassa che ad alta velocità ed in transitorio.

Al contrario, il difetto eseguito su di un elemento volvente è difficilmente identificabile in quanto, anche se presenti nelle distribuzioni in frequenza, le frequenze caratteristiche non hanno un'ampiezza predominante rispetto alle altre componenti presenti quali le armoniche di rotazione di motore e di utilizzatore e le armoniche di alimentazione elettrica.

Nell'ambito dei difetti esaminati su questo tipo di cuscinetto, quello consistente in un aumento del gioco assiale tra le due componenti della pista interna (*axial clearance*) non è stato identificato in nessun test, in quanto, essendo il difetto distribuito sull'intera lunghezza della pista, e non localizzato in un punto, non da luogo ad eventi di tipo transitorio, ma ad un comportamento costante difficilmente rilevabile con metodologie di questo tipo.

Nel caso si tratti di cuscinetti a rulli la *Spectral Kurtosis* ha permesso di identificare il difetto in un numero minore di casi: questo non è da attribuirsi alla tecnica in sé quanto piuttosto alla natura dei difetti realizzati. In particolare, nel caso di difetti di piccole dimensioni e posizionati al centro dell'elemento volvente o delle piste, l'identificazione è risultata essere impossibile. Questa difficoltà è dovuta alla natura del contatto fra rullo e pista, che risulta maggiormente distribuito sui bordi piuttosto che al centro. In altre parole i difetti di piccola entità localizzati al centro degli elementi del cuscinetto non danno luogo a transitori tali da eccitare a sufficienza le frequenze caratteristiche nello spettro.

Al contrario i difetti di maggiore dimensione, anche se realizzati al centro delle piste e degli elementi volventi, riescono ad introdurre maggiore energia nel segnale di vibrazione in modo tale da far risaltare le frequenze caratteristiche rispetto alle componenti classiche di rotazione e di alimentazione (componenti elettriche).

Il difetto realizzato sulla gabbia è sempre ben visibile in tutti i test e a qualunque velocità; è necessario però precisare che la frequenza caratteristica è stata riscontrata anche quando la gabbia non presentava difetti, rendendo di fatto impossibile la diagnostica di questo tipo di danneggiamento in quanto, in una eventuale applicazione in ambito industriale, si correrebbe il rischio di fermare la macchina a causa di un difetto inesistente erroneamente diagnosticato.

I dati di vibrazione sono stati ricavati mediante l'uso di apposita sensoristica posizionata sul sistema (accelerometri); nell'ottica di ridurre la complessità e la dimensione del sistema di acquisizione si è focalizzata l'attenzione sulla possibilità di fare diagnostica *sensorless* sui cuscinetti volventi applicati ai motori elettrici.

A questo proposito, prendendo spunto da lavori precedenti reperiti in bibliografia, sono stati analizzati i dati di corrente provenienti dal medesimo banco prova utilizzato per la diagnostica mediante segnali di vibrazione.

A questa si è aggiunta l'analisi dei dati di tensione per indagare se questi possano sostituire o completare i dati di corrente.

Il sistema di acquisizione utilizzato permette di memorizzare solo una piccola parte dei segnali di tensione e di corrente utilizzati per controllare il motore REGINA; più precisamente si ha a disposizione l'ultimo secondo del test 12 (svolto a velocità costante pari a 160 km/h).

A questi dati sono state applicate tre diverse tecniche di analisi dei segnali perché si è voluto investigare quale restituisse i risultati migliori in termini di diagnostica su cuscinetti volventi.

Contrariamente ai risultati presentati in bibliografia, l'analisi di tali dati non ha fornito esiti soddisfacenti con nessuna delle tecniche di analisi utilizzate.

La *Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Fourier Transform* applicata alle singole *Intrinsic Mode Functions* non ha permesso di individuare frequenze caratteristiche riconducibili ai difetti né sui segnali di tensione né sui segnali di



corrente; negli distribuzioni in frequenza finali infatti sono state identificate solamente le armoniche della frequenza di alimentazione del motore.

Le stesse conclusioni possono essere tratte facendo seguire alla *Empirical Mode Decomposition* una *Envelope Analysis*: l'identificazione dei difetti non è possibile in nessun test, ma sono state riscontrate solamente le armoniche della frequenza di alimentazione del motore.

La terza tecnica utilizzata (*Empirical Mode Decomposition* seguita da *Spectral Kurtosis*) è quella che ha fornito i migliori riscontri: è stato possibile, anche se in un solo caso, identificare la frequenza caratteristica del difetto presente (elemento volvente) analizzando i segnali di corrente (in analogia a quanto viene riportato in bibliografia sull'argomento). Per quanto riguarda i segnali di tensione invece, anche con questa tecnica non si è potuto diagnosticare i difetti.

Una volta effettuata l'analisi sui segnali di vibrazione provenienti dal banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità la medesima tecnica di *signal processing* è stata applicata ai dati di vibrazione provenienti da un banco prova allestito nel laboratorio sperimentale del Politecnico di Milano.

Anche in questo caso la *Spectral Kurtosis* ha dato un ottimo riscontro in termini diagnostici.

Nei casi di difetti realizzati sulle piste interna ed esterna i risultati hanno confermato quanto già ottenuto nel caso dell'analisi dei dati del banco prova per il sistema di trazione del treno ad alta velocità.

L'unica differenza rilevata riguarda il caso di danneggiamento sugli elementi volventi: negli spettri sono state individuate non solo le armoniche intere della frequenza caratteristica BSF, ma anche quelle spaziate di  $0,5 \times \text{BSF}$ ; questo potrebbe essere dovuto al fatto che il rullo danneggiato non sia caratterizzato da un moto di puro rotolamento ma strisci in maniera casuale sulle piste interna ed esterna durante la rotazione dell'albero.

Il difetto sulla gabbia non è stato indagato in quanto non ritenuto di particolare interesse.

Al fine di aumentare ulteriormente la capacità diagnostica sui segnali di vibrazione, si sono combinate due tecniche di analisi: la *Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Spectral Kurtosis* applicata alle singole *Intrinsic Mode Functions*. Questo ha permesso di suddividere il segnale in bande di frequenza e rendere ancora più visibili le frequenze caratteristiche dei difetti.

Solamente nei casi di difetto di piccole dimensioni sulla pista interna e difetti su entrambi i cuscinetti che supportano il rotore questa tecnica non ha permesso di incrementare la capacità diagnostica della *Spectral Kurtosis*.

A causa dei risultati non soddisfacenti ottenuti sui dati di tensione e corrente provenienti dal banco prova per la diagnostica del sistema di trazione del treno ad alta velocità, si è deciso di analizzare la stessa tipologia di dati provenienti da questo banco prova più semplice, al fine di indagare se la scarsa capacità diagnostica sia da attribuirsi alla complessità del sistema o all'approccio diagnostico stesso.

La tecnica di analisi utilizzata è la *Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Spectral Kurtosis* sulla singole *Intrinsic Mode Functions*, in quanto sul banco prova per la diagnostica del sistema di trazione del treno ad alta velocità è stata ritenuta quella che presenta migliore efficacia diagnostica.

Anche in questo caso però, i risultati ottenuti non hanno dato esito positivo: in nessun caso è stato possibile diagnosticare il difetto pur associando quest'ultimo a dimensioni notevoli.

Negli spettri ottenuti risultano identificabili solamente le componenti armoniche dovute all'alimentazione e alla rotazione del motore, sia nelle analisi dei segnali di corrente sia nelle analisi dei segnali di tensione.

Stanti i sopracitati risultati si è comunque cercato di ottenere una indicazione da questo tipo di segnali andando a valutare il valore RMS della corrente circolante nel motore: analizzando criticamente i valori riportati in tabella 6.4 si è osservato che nella quasi totalità dei test la corrente circolante nel motore risulta avere un valore RMS inferiore rispetto al test di riferimento in cui sono montati entrambi cuscinetti integri, in accordo ai risultati presentati in bibliografia.

Questo comportamento però non permette di concludere nulla sulla natura del difetto presente sui cuscinetti.

Medesime conclusioni possono essere tratte considerando la variazione percentuale della corrente fra il caso di cuscinetto danneggiato rispetto al caso di cuscinetto integro.

In conclusione si può affermare che la diagnostica di cuscinetti volventi sfruttando la *Spectral Kurtosis* applicata a segnali di vibrazione fornisce risultati robusti, anche se l'acquisizione di questo tipo di dati comporta una maggiore complessità del sistema e una maggiore mole di dati da analizzare.

Nell'analisi dello stesso tipo di dati l'utilizzo della *Empirical Mode Decomposition* seguita dalla *Spectral Kurtosis* permette di ottenere risultati analoghi alla diretta applicazione della *Spectral Kurtosis*, a costo però di un onere computazionale sensibilmente maggiore.

Allo stato attuale, le tecniche analizzate in questo lavoro, applicate ai segnali di corrente e di tensione, non permettono di effettuare una diagnostica *sensorless* sui cuscinetti volventi dei motori elettrici.

Questo può essere dovuto a cause che non è stato possibile chiarire in questo lavoro né sulla base della bibliografia né sulla base dei risultati sperimentali.

Una possibilità può essere rappresentata dal fatto che le tecniche di analisi dei segnali utilizzate sono adatte allo studio di vibrazioni ma non all'analisi di segnali di tensione e di corrente correlati e caratterizzati da dinamiche diverse.

In altre parole, dal punto di vista diagnostico, una elevata efficienza evidenziata da una tecnica per una certa tipologia di segnali non comporta necessariamente un analogo livello di efficienza per grandezze diverse.

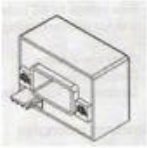
Un possibile sviluppo dell'approccio diagnostico utilizzato in questo lavoro può riguardare l'applicazione di tecniche di analisi di natura diversa sui segnali di

corrente o di tensione e l'approfondimento dei fenomeni che si instaurano in questo tipo di grandezze in concomitanza dei difetti sui cuscinetti.

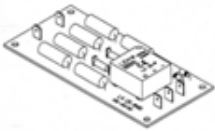


# ALLEGATO A


## A1. Trasduttore di corrente LEM HAS 50 – S.

	Electrical Data
<i>Primary nominal current RMS (<math>I_{pn}</math>)</i>	50 A
<i>Primary current measuring range</i>	$\pm 150$ A
<i>Supply Voltage</i>	$\pm 15$ V
<i>Current Consumption</i>	$\pm 15$ mA
<i>Output Voltage</i>	$\pm 4$ V $\pm 40$ mV
<i>Accuracy</i>	$< \pm 1\%$
<i>Response time to 90% of <math>I_{pn}</math></i>	$< 3\mu\text{s}$

## A2. Trasduttore di tensione LEM LV 25-1000.

	Electrical Data
<i>Primary nominal RMS voltage (<math>V_{pn}</math>)</i>	1000 V
<i>Primary voltage measuring range</i>	$\pm 1500$ V
<i>Supply Voltage</i>	$\pm 12 - 15$ V
<i>Current Consumption</i>	10 mA
<i>Conversion ratio</i>	1000 V / 25 mA
<i>Accuracy</i>	$< \pm 0.8\%$
<i>Response time to 90% of <math>V_{pn}</math></i>	40 $\mu\text{s}$

### A3. Accelerometro Wilcoxon Research 786A.

	<b>Technical Data</b>
<i>Acceleration Range</i>	80 g <i>peak</i>
<i>Sensitivity</i>	96 mV / g
<i>Resonance frequency</i>	30000 Hz
<i>Voltage Source</i>	18 – 30 VDC
<i>Conversion ratio</i>	1000 V / 25 mA
<i>Sensing element design</i>	<i>PZT ceramic / shear</i>
<i>Frequency Response</i>	1 – 9000 Hz

## Nomenclatura e lista degli acronimi

SK	<i>Spectral Kurtosis</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
BPFI	<i>Ball Pass Frequency Inner Race</i>
BPFO	<i>Ball Pass Frequency Outer Race</i>
BSF	<i>Ball Spin Frequency</i>
FTF	<i>Fundamental Train Frequency</i>
Z	Numero corpi volventi
d	Diametro del corpo volvente
D	Diametro di <i>pitch</i>
$\beta$	Angolo di contatto
$g(\theta, t)$	Gioco radiale del motore ( <i>gap</i> )
$B_{tot}(\theta, t)$	Densità del flusso elettromagnetico
$I_m(t)$	Corrente statorica
$g_o$	Gioco radiale di progetto del motore
e	Eccentricità
$\theta$	Posizione angolare
$\psi(t)$	Indicatore del difetto del cuscinetto
$\delta$	Delta di Dirac
$f_c$	Frequenza caratteristica del difetto
$\Lambda(\theta, t)$	Permeanza magnetica
$\mu$	Permeanza magnetica del <i>gap</i>
$MMF(\theta, t)$	Forza magnetomotrice
p	Numero di paia poli
$\omega_s$	Pulsazione della corrente di alimentazione
$\varphi$	Fase
t	Istante temporale
$\Phi(\theta, t)$	Flusso magnetico
$V_m(t)$	Differenza di potenziale statorica
$R_s$	Resistenza statorica
$f_r$	Frequenza di rotazione dell'albero
$\omega_g$	Pulsazione di rotazione della gabbia
$f_s$	Frequenza di alimentazione
$f_g$	Frequenza di rotazione della gabbia
$\Gamma_0$	Componente costante della coppia erogata dal motore
$\Gamma_c$	Componente variabile della coppia erogata dal motore
$\Gamma_{motor}$	Coppia elettromagnetica prodotta dal motore
$\Gamma_{load}$	Coppia richiesta dal carico

$\omega_c$	Pulsazione caratteristica del difetto
$\omega_r$	Velocità angolare di rotazione del motore
$J$	Inerzia totale del carico
$\omega_{r0}$	Componente costante della velocità angolare
$\theta_r(t)$	Posizione angolare del rotore
$A_c$	Ampiezza della variazione angolare
$x(t)$	Generico segnale
$T$	Durata totale del segnale
$\frac{\sigma_x^2}{x'^2}$	Varianza del segnale
$\overline{x'^2}$	Momento del secondo ordine centrale
$N$	Numero di punti del segnale
$\bar{x}$	Valor medio del segnale
$\overline{x'^3}$	Momento del terzo ordine centrale
$S$	<i>Skewness</i>
$\overline{x'^4}$	Momento del quarto ordine centrale
$K$	<i>Kurtosis</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i> (valore quadratico medio)
CF	<i>Crest Factor</i>
$V_{picco}$	Valore di picco del segnale
$V_{RMS}$	Valore RMS del segnale
$R_{xx}(\tau)$	Autocorrelazione
$R_{xy}(\tau)$	Crosscorrelazione
$\tau$	Sfasamento fra due segnali
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FT	<i>Fourier Transform</i>
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
$f(t)$	Generico segnale
$w(t - \tau)e^{j\omega t}$	Funzione <i>Kernel</i>
$\Delta t$	Spaziatura temporale
$\Delta f$	Spaziatura in frequenza
$f$	Frequenza
$W_f(a, b)$	Trasformata <i>wavelet</i>
$a$	Fattore di scala della <i>wavelet</i>
$b$	Time shift della <i>wavelet</i>
$\psi$	<i>Mother wavelet</i>
$\psi_{a,b}(t)$	<i>Baby wavelet</i>
CWT	<i>Continuos Wavelet Transform</i>
EA	<i>Envelope Analysis</i>
$s(t)$	Generico segnale
$s_a(t)$	Segnale analitico



$s_h(t)$	Parte immaginaria del segnale $s(t)$
EMD	<i>Empirical Mode Decomposition</i>
HHT	<i>Hilbert-Huang Transform</i>
IMF	<i>Intrinsic Mode Function</i>
$Y(t)$	Trasformata di Hilbert-Huang
P	Valore principale di Cauchy
$t'$	Sfasamento temporale
$a(t)$	Modulo del segnale analitico
$\theta(t)$	Fase del segnale analitico
IF	<i>Istantaneous Frequency</i> (frequenza istantanea)
HHS	<i>Hilbert-Huang Spectrum</i>
CNS	<i>Conditionally Non-Stationary processes</i>
$h(t)$	Risposta all'impulso
$X(t)$	Generico segnale
$H(f)$	Trasformata di Fourier della risposta all'impulso
$h(t, s)$	Risposta all'impulso tempo-variante
$H(t, f)$	Trasformata di Fourier della risposta all'impulso tempo-variante
$H(t, f, \bar{\omega})$	<i>Complex Envelope</i>
$\bar{\omega}$	Variabile <i>random</i>
$C_{4Y}(f)$	Cumulata spettrale del quarto ordine di $Y(t)$
$S_{4Y}(f)$	Momento spettrale del quarto ordine di $Y(t)$
$S_{2Y}(f)$	Momento spettrale del secondo ordine di $Y(t)$
$K_Y(f)$	Definizione della <i>Spectral Kurtosis</i>
$k_x$	Indice di Kurtosi
$Z(t)$	Processo caratterizzato da rumore
$Y(t)$	Generico processo $Y(t)$
$N(t)$	Rumore indipendente da $Y(t)$
$S_{2N}(f)$	Momento spettrale del secondo ordine di $N(t)$
$K_Z(f)$	Definizione della <i>Spectral Kurtosis</i> per il processo $Z$
$\rho(f)$	Rapporto rumore/segnale
MTU	Motore-Trasmissione-Utilizzatore
$\tau$	Rapporto di trasmissione
U	Fase U del motore
V	Fase V del motore
W	Fase W del motore
NI	<i>National Instruments</i>



## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. R. Higgins, R. K. Mobley, and R. Smith, Maintenance Engineering Handbook, 6th ed., Mc Graw-Hill, 2002.
- [2] J. Antoni, Cyclic spectral analysis of rolling element bearing signals: facts and fictions, *Journal of Sound and Vibration* 304, 2007, pagg. 497-529.
- [3] B. Zhang et al., Rolling element bearing feature extraction and anomaly detection based in vibration monitoring, *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2008.
- [4] R. B. Randall, Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes, *Engineering Failure Analysis*, no. 11, 2004, pagg. 177-190.
- [5] J. Antoni, R. B. Randall, Differential diagnosis of gear and bearing faults, *Journal of Vibration and Acoustics*, no. 124, 2002, pagg. 165-171.
- [6] J. Mathew, R. J. Alfredson, The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, no. 106, 1984.
- [7] D. Ho, R. B. Randall, Manifestation of bearing fault vibrations in gearboxes, *Sixth International Congress on Sound and Vibration*, 1999.
- [8] D. Yu, J. Cheng, Y. Yang, Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 19, 2005, pagg. 259-270.
- [9] G. A. Radcliff, Condition monitoring of rolling element bearings using the enveloping technique, *Mechanical Engineering Publication Ltd*, 1990.
- [10] Q. Du, S. Yang, Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 21, 2007, pagg. 2634-2644.
- [11] V. K. Rai, A. R. Mohanty, Bearing fault diagnosis using FFT of Intrinsic Mode Functions in Hilbert-Huang Transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 21, 2007, pagg. 2607-2615.

- [12] R. R. Schoen, T. Habetler, F. Kamran, R. Bartheld, Motor bearing damage detection using stator current monitoring, *IEEE*, vol. 31, no. 6, 1995, pagg. 1274-1279.
- [13] Yuh-Tay Sheen, An envelope analysis based on the resonance modes of the mechanical system for the bearing defect diagnosis, *Measurement*, no. 43, 2010, pagg. 912-934.
- [14] R. B. Randall, J. Antoni, S. Chobsaard, A comparison of cyclostationary and envelope analysis in the diagnostics of rolling element bearings, *IEEE*, 2010, pagg. 3882-3885.
- [15] Y. T. Su, S. J. Lin, On the initial fault detection of a tapered roller bearing: frequency domain analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 155, 1992.
- [16] J. Antoni, The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 20, 2006, pagg. 282-307.
- [17] J. Antoni, R. B. Randall, The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 20, 2006, pagg. 308-331.
- [18] J. Halme, P. Andersson, Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics – state of the art, *Institution of Mechanical Engineers*, 2009.
- [19] J. Antoni, Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults, *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 21, 2007, pagg. 108-124.
- [20] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing, Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring, *IEEE*, vol. 55, no. 4, 2008, pagg. 1813-1822.
- [21] L. Eren, Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of the stator current, *IEEE*, 2004.
- [22] I. Rodriguez, R. Alves, Bearing damage detection of the induction motors using current analysis, *IEEE*, vol. 53, no. 2, 2006, pagg. 431-436.
- [23] R. R. Obaid, T. G. Habetler, G. R. Stack, Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors, *SDEMPED*, 2003.

## SITI INTERNET

- [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [www.skf.com](http://www.skf.com)
- [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [www.wilcoxon.com](http://www.wilcoxon.com)
- [www.fag.de](http://www.fag.de)
- [www.stab-italia.com](http://www.stab-italia.com)
- [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [www.ieee.com](http://www.ieee.com)