Exp # 9

PH212

LOCK-IN DETECTION

Objective of the experiment:

- a. To understand the working principle of lock-in-Detection
- b. To learn soldering technique
- c. Combine two signals from independent frequency generators using a adder circuit with the help of operational amplifier (741) and detect only one of the frequencies from the mixed output by using Lock in Amplifier

Procedure:

- 1. Design the adder circuit with the op-amp on bread board and test it with the oscilloscope. Later replicate the same circuit on PCB.
- 2. Check the functioning of the Lock-in amplifier using the procedure described in the Lock-in manual.
- 3. Provide a sinusoidal signal of amplitude about 1V peak-to-peak and frequency about 1 kHz to the first input your adder circuit, while keeping the second input to your adder grounded. Measure the output amplitude using the Lock-in amplifier (you can do this by connecting its output to the oscilloscope). Repeat the same experiment for the second input by grounding the first input. Compare the results of the two experiments with theory and comment on the observed differences.
- 4. Provide two sinusoidal signals of amplitudes 1 V peak-to-peak and frequencies about 1 kHz and 10 kHz respectively to the two inputs of the adder. Provide the 1 kHz signal also as the reference to the Lock-in amplifier. Measure the output of the adder using the lock-in amplifier and comment on the result. Now, reduce the amplitude of the 1 kHz signal to 100 mV peak-to-peak and measure the output of the adder using the lock-in generating the lock-in amplifier.

5. (optional) Provide two sinusoidal signals of amplitudes 1 V peak-to-peak and frequencies of 1 kHz and 1.020 kHz respectively to the two inputs of the adder. Let the bandwidth of the Lock-in amplifier be set to 50 Hz. Observe the output of the lock-in amplifier and explain the observed result. Now reduce the bandwidth to 5 Hz. Sketch the observed output and explain the observed result. Finally, set both the function generators to source 1V peak-to-peak and the same frequency of 1 kHz. Observe the output of the lock-in amplifier and explain the observed result.



07/94 -Bb-



1. Sicherheitshinweise

Das Gerät ist für den Anschluß an 230 V AC ausgelegt. Es kann intern auf 115 V umgestellt werden. In diesem Fall muß die Schmelzsicherung 125 mA träge gegen 250 mA träge ausgewechselt werden. Die Buchsen INPUT und SYNC. sind Eingänge. Hier dürfen maximal ± 10 V eingespeist werden, s. Meßbereiche in Abschnitt 4.3. Die Buchsen PSD und OUT sind Ausgänge. Hier dürfen keine Funktionsgeneratoren oder Signalquellen angeschlossen werden. Das Gerät entspricht den Sicherheitsbestimmungen nach VDE 0411. Bei sachgemäßer Verwendung ist die Sicherheit des Experimentierenden und der angeschlossenen Geräte gewährleistet. Um Bedienungsfehler auszuschließen, wird empfohlen diese Gebrauchsanweisung sorgfältig zu lesen.

2. Beschreibung

2.1 Funktionsprinzip

Dem Versuch sehr kleine Nutzsignale quantitativ messen zu wollen, setzen Stör- und Rauschsignale eine natürliche Grenze. Von praktischer Bedeutung ist dabei das Signal-/ Rauschverhältnis. Die Fig. 1 verdeutlicht diesen Sachverhalt.



Gebrauchsanweisung Instruction Sheet 737 041

Lock-In-Verstärker Lock-In Amplifier

1. Safety instructions

This device is designed for connection to 230 V AC. It can be converted internally to 115 V. If this is performed, the slow blowing 125 mA fuse is exchanged for a slow-blowing 250 mA fuse. The sockets INPUT and SYNC are inputs. Here a maximum of +/- 10 V may be fed, see the measurement ranges in Section 4.3. The sockets PSD and OUT are outputs. Here it is categorically forbidden to connect function generators or signal sources to these outputs. This device corresponds to the safety requirements laid down in VDE 0411. When this device is handled properly we guarantee the safety of the persons performing the experiments and any connected equipment. In order to avoid operating errors altogether we recommend that this instruction sheet be read with care.

2. Description

2.1 How the device works

Distortion and noise set natural limits to any attempt at carrying out quantitative measurements on very small signals. Here, the signal-to-noise ratio is of practical significance. Fig. 1 illustrates this problem.

- Fig.1: Schwaches Nutzsignal bei starkem Rauschen
- (1) Nutzsignal
- ② Rauschen
- Fig. 1: Weak signal with severe noise
- 1 Signal
- 2 Noise

Betrachtet man z.B. die thermisch bedingte, mittlere Rauschspannung eines Widerstandes :

 $U_{neff} = \sqrt{4kTbR}$

mit:

- k: Boltzmannkonstante
- T: absolute Temperatur in Kelvin
- b: Bandbreite
- R: Widerstand

dann ergeben sich für die Praxis folgende Möglichkeiten zur Verbesserung des Signal-/ Rausch-Verhältnisses:

- 1. Niederohmige Messung, d.h. verkleinern von R
- 2. Messung bei reduzierter Bandbreite b, d.h. frequenzselektives messen

Beim Lock-In Verstärker wird das 2. Verfahren ausgenutzt. Da sich die Messung nur auf die Ermittlung der Amplitude des Meßsignals bezieht, und dessen Frequenz und Phasenlage bekannt sind, können diese Parameter dem Meßempfänger getrennt zugeführt und zur Verbesserung des Signal-Rausch Verhältnisses herangezogen werden.

Das Prinzip der frequenzselektiven Messung ist in Fig. 2 spektral dargestellt.



- 1 Nutzsignal
- 2 Rauschen
- ③ Amplitudenfrequenzgang des Bandpasses

Der prinzipielle Aufbau eines Lock-In Verstärkers ist in Fig. 3 dargestellt.



If we take, for example, the thermally-induced, medium noise voltage of a resistor:

 $U_{neff} = \sqrt{4kTbR}$

where:

- k: Boltzmann's constant
- T: absolute temperature in Kelvin
- b: bandwidth
- R: resistance

then we come up with the following practical possibilities for improving the signal-to-noise ratio:

- 1st Low-ohmic measurement, i.e. reducing R
- 2nd Measurement at reduced bandwidth b, i.e. frequency selective measurement

The 2nd procedure is exploited in lock-in amplifiers. Because the measurement is only aimed at determining the amplitude of the measured signal, and its frequency and phase relation are known, these parameters can be supplied separately to the measurement receiver and utilized for the improvement of the signal-to-noise ratio.

The principle of frequency selective measurement is depicted in Fig. 2.

- Fig. 2: Frequenzselektives Messen mittels Bandpassfilterung
- Fig. 2: Frequency selective measurement using bandpass filtering
- 1 Signal
- 2 Noise
- ③ Amplitude frequency response of the bandpass
- The basic design of the lock-in amplifier is depicted in Fig. 3.

- Fig. 3: Prinzipieller Aufbau eines Lock-In Verstärkers
- Fig. 3: Basic design of a lock-in amplifier

- ① Vorverstärker ② Synchrongleichrichter
- ③ Tiefpassfilter
- Meßgerät
- 5 Phasenschieber

Das in (1) vorverstärkte Signal gelangt an den Eingang des Synchrongleichrichters (2). Dieser wird von einem Steuersignal (SYNC) geschaltet, welches dieselbe Frequenz besitzt wie das Nutzsignal. Durch den Phasenschieber (5) kann die Phasenlage so eingestellt werden, das sich eine optimale Vollwellengleichrichtung einstellt. Der Phasenwinkel ϕ kennzeichnet dabei die Verschiebung zwischen dem Synchron- und dem Nutzsignal. Die Folgen eines nicht optimalen Phasenabgleichs sind in Fig. 4 dargestellt. Dort ist das Ausgangssignal des Synchrongleichrichters abgebildet.

- ① Preamplifier
- ② Synchronous rectifier
- ③ Lowpass filter
- Measurement instrument
- ⑤ Phase shifter

The signal preamplified in (1) reaches the input of the synchronous rectifier (2). This component is switched by a control signal (SYNC), which has the same frequency as the input signal. Using the phase shifter (5) the phase relation can be set so that an optimum full-wave rectification is set. The phase angle ϕ characterizes the shift between the synchronous signal and the input signal. The consequences of an imperfect phase setting are presented in Fig. 4. The output signal of the synchronous rectifier is depicted there.



Fig. 4: Ausgangssignal des Synchrongleichrichters bei verschiedenen Phasenwinkeln ϕ

Man erkennt, daß bei $\phi = 0^{\circ}$ der D.C. Anteil im Ausgangssignal maximal ist. Bei $\phi = 90^{\circ}$ ist $U_{DC} = 0$. Allgemein gilt für den Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel ϕ und der Gleichspannung U_{DC}:

$U_{DC}\approx A\cos\phi$

A: Amplitude des Nutzsignals

Die im Ausgangssignal des Synchrongleichrichters auftretenden, Wechselspannungsanteile werden mit Hilfe des Tiefpasses ③ ausgefiltert. Eingangssignale mit $f_e \neq f_{SYNC}$ liefern durch die modulierende Wirkung des Synchrongleichrichters Spektralanteile mit Frequenzen bei:

$f = i m \cdot f_{SYNC} \pm f_{\theta} i$, und werden deshalb unterdrückt.

Der Lock-In Verstärker wandelt ein AC-Eingangssignal in ein DC-Ausgangssignal um. Anders als bei einfachen Bandpaßsystemen ist der Lock-In Verstärker zusätzlich phasenselektiv. Selbst störende Eingangsignale mit gleicher Frequenz wie der des Nutzsignals, aber unterschiedlicher Phasenlage, werden mit cos \u03c6 bewertet abgeschwächt! Die Bandbreite b eines Lock-In Verstärkers wird durch die Grenzfrequenz fc des Tiefpasses festgelegt. Es gilt:

 $b = 2 \cdot f_C$

In der Fig. 5 ist der Einsatz eines Lock-In Verstärkers skizziert. Der Funktionsgenerator 1 liefert sowohl das zur Synchronisierung benötigte Taktsignal, als auch das Eingangssignal des zu untersuchenden Prüflings 2. Das Ausgangssignal des Prüflings wird dem Eingang des Lock-In Verstärkers zugeführt. Nach Optimierung des Phasenwinkels ϕ kann der Betrag der Ausgangsspannung gemessen werden. Fig. 4: Output signal of the synchronous rectifier at various phase angles ϕ

We can see that at $\phi = 0^{\circ}$ the DC component in the output signal is maximum. At $\phi = 90^{\circ}$ we have $U_{DC} = 0$. In general the following holds true for the relationship between the phase angle ϕ and the DC voltage U_{DC} :

$U_{DC}\approx A\cos\phi$

A: Amplitude of the signal

The AC voltage components arising in the output signal of the synchronous rectifier are filtered out with the aid of a lowpass filter (3). In input signals where $f_e \neq f_{SYNC}$ the modulating effect of the synchronous rectifier brings about spectral components with frequencies of:

 $f = | m \cdot f_{SYNC} \pm f_e |$ and are thus suppressed.

The lock-in amplifier converts an AC-input signal into a DC output signal. Unlike in simple bandpass systems, the lock-in amplifier is also phase-selective. Even disturbing input signals with the same frequency as the signal, but with a different phase relation, are significantly attenuated with $\cos \phi$! The bandwidth b of a lock-in amplifier is set by the limiting frequency f_C of the lowpass filter. The following applies:

$b = 2 \cdot f_C$

In Fig. 5 the application of a lock-in amplifier is illustrated. The function generator 1 supplies both the clock signal required for synchronization, as well as the input signal of the device under test 2. The output signal of the device under test is supplied to the input of the lock-in amplifier. After the phase angle ϕ has been optimized, the magnitude of the output voltage can be measured.



① Funktionsgenerator

Vierpol (Prüfling=DUT)

3 Lock-In Verstärker

2.2 Anwendungsgebiete

Mit dem Lock-In Verstärker 737 041 lassen sich noch Spannungen im μ V Bereich ausmessen. Damit ist er das ideale Messgerät bei der Durchführung von Vesuchen zum Nebensprechen an Leitungen (TPS 7.2.4.2) in der optischen Nachrichtentechnik, der Mikrowellentechnik , Antennentechnik usw.

3. Technische Daten

Netzspannung:	230 V intern umstellbar auf 115 V
Nennfrequenz:	50/60 Hz
Leistungsaufnahme:	ca. 14 VA
Sicherheits-	
bestimmungen:	VDE 0411
Abmessungen:	290 x 320 x 150 einschl. 19"-Gehäuse
Gewicht:	5 kg
Prinzip:	Lock-In-Detektion mit externer Synchronisierung
Anzeigen:	V in dB +2dB40dB V linear 01 V/ 03,16 V Phasenwinkel 0180°
Meßwerk:	Kl.1.5 mit Spiegelskala und Nullpunktkorrektur
Eingang:	unbiased, 1kΩ
Dynamikbereich :	0110dB in 12 Stufen einstellbar 10dB zusätzlich über variable Verstärkung
Genauigkeit:	± 0,5dB
Empfindlichkeit:	7,75 μVrms bei 0dB Anzeige
Synchronisations-	
bereich:	500 Hz 20 kHz
Bandbreite:	in 4 Stufen wählbar: 1/5/10/50 Hz
Ausgang:	DC-Ausgang für die Meßspannung 0+10 V.
Buchsen:	BNC

Fig. 5: Ausmessen eines Vierpols mit Hilfe des Lock-In Verstärkers

Fig. 5: Measuring a 2-port using the lock-in amplifier

① Function generator ② 2-port (DUT)

③ Lock-in amplifier

2.2 Areas of application

Using the lock-in amplifier 737 041 voltages even in the μ V range can be measured. Consequently it is the ideal measuring instrument for carrying out experiments in, e.g. cross-talk on transmission lines (TPS 7.2.4.2), in optical communications, in microwave technology, antenna technology etc.

3. Technical data

Mains voltage:	230 V internal convertible to 115 V
Nominal frequency:	50/60 Hz
Power consumption:	approx. 14 VA
Safety requirements:	VDE 0411
Dimensions:	290 x 320 x 150 incl. 19"-housing
Weight:	5 kg
Principle of operation:	Lock-in detection with external synchronization
Display:	V in dB +2dB40dB V linear 01 V/ 03.16 V Phase angle 0180°
Measuring instrument:	Term. 1.5 with mirror scale and zero-point correction
Input:	unbiased, 1kΩ
Dynamic range:	0110dB adjustable in 12 steps 10dB additional via variable gain
Accuracy:	± 0.5dB
Sensitivity:	7.75 μ V _{ms} for display of 0dB
Synchronization	
range:	500 Hz 20 kHz
Bandwidth:	selectable in 4 steps: 1/5/10/50 Hz
Output:	DC output for the measurement voltage 0+10 V.
Sockets:	BNC

4. Bedienung

4.1 Frontplatte

Die Frontplatte des Lock-In Verstärkers ist in Fig. 6 dargestellt.

4. Operation

4.1 Front panel

The front panel of the lock-in amplifier is depicted in Fig. 6.



Fig. 6: Frontplatte des Lock-In Verstärkers 737041

- ① Netzschalter
- ② Kippschalter f
 ür Wechsel der Anzeige von Phase auf Verst
 ärkung
- ③ LED zur Anzeige des Lock-In Zustandes
- LED zur Anzeige einer Übersteuerung
- 5 Eingang für Meßsignal
- 6 Eingang für Synchronsignal
- ⑦ Nullpunktkorrektur des Meßwerkes
- 8 Ausgang des phasenempfindlichen Detektors
- (9) Ausgangssignal des Lock-In Verstärkers
- 1 Kippschalter für Invertierung der Phase
- 1 Wahlschalter für Bandbreite
- Phasenschiebung zwischen Synchron- und Eingangssignal
- (13) Stufenschalter für Verstärkung
- (Variable Verstärkung
- (b) Meßwerk mit Skalen für Verstärkung und Phase

Fig. 6: Front panel of the lock-in amplifier 737041

- 1 Mains switch
- ② Toggle switch for switching the display from phase to gain
- ③ LED for the indicating the lock-in status
- LED for indicating overload
- (5) Input for measurement signal
- Input for synchronous signal
- ⑦ Zero-point correction of the measuring instrument
- (8) Output of the phase-sensitive detector
- (9) Output signal of the lock-in amplifier
- 10 Toggle switch for inverting the phase
- 1 Selection switch for the bandwidth
- Phase shift between the synchronous signal and the input signal
- ⁽¹³⁾ Stepping switch for gain
- (Variable gain
- ⁽⁵⁾ Measuring instrument with scale for gain and phase

4.2 Inbetriebnahme

Bauen Sie den Versuch nach Fig. 7 auf.

4.2 Putting the unit into operation

Set the experiment up as shown in Fig. 7.



(1) Funktionsgenerator

- ② Lock-In Verstärker
- 3 Oszilloskop

Oszilloskop an (8) PSD. Schalter (2) DISPLAY nach links auf PHASE. Die im Meßwerk links sitzende LED PHASE leuchtet auf und markiert die abzulesende Skala ϕ /GRD. Variable Verstärkung GAIN (13) auf Rechtsanschlag, Stufenschalter für Verstärkung (14) auf 10dB. Synchronisationssignal vom Funktionsgenerator in (6) SYNC einspeisen.

Hinweis: Viele Funktionsgeneratoren besitzen dazu einen separaten TTL Ausgang. Manchmal ist das TTL Signal um 90° gegen die Ausgangssignale des Funktionsgenerators versetzt. Eventuell muß für den Phasenabgleich der Kippschalter (10) zum Invertieren der Phase umgeschaltet werden. Das Einrasten auf das Synchronsignal wird durch die Leuchtdiode (3) LOCK-IN unterhalb des Kippschalters DISPLAY angezeigt.

Bandbreitenschalter BW/Hz (11) auf 50 stellen.

Hinweis: Bei sehr stark verrauschten Signalen kann die Bandbreite bis auf 1 Hz verkleinert werden.

4.3 Absolute Messungen

Speisen Sie ein Sinussignal mit 775 mVrms (ca. 1.1 V Amplitude) und etwa 2 kHz in (5 INPUT ein. Gleichen Sie mit dem Phaseneinsteller (2) PHASE auf 0° ab. Lesen Sie dazu die entsprechende Skala ab. Beobachten Sie zusätzlich mit dem Oszilloskop am PSD Ausgang (8) die Phase des Synchrongleichrichters, s. Fig. 4. Schalten Sie den Kippschalter (2) DISPLAY nach rechts auf GAIN. Die LED GAIN im Meßwerk leuchtet auf. Jetzt gelten die Verstärkungsskalen U/dB bzw. U/V. Der Zeiger des Meßinstruments soll jetzt auf 0dB stehen. ① Function generator

2 Lock-in amplifier

③ Oscilloscope

Connect oscilloscope to (a) **PSD**. Set switch (c) **DISPLAY** to the left to **PHASE**. The LED **PHASE** situated to the left in the measuring instrument lights up and indicates the scale to be read ϕ /GRD. Variable gain control **GAIN** (b) is set to the far right limit, the step switch for gain (b) is set to 10dB. Feed the synchronization signal from the function generator into (c) **SYNC**.

Note: many function generators have a separate TTL output for this. Sometimes the TTL signal is displaced by 90° with respect to the output signal of the function generator. For phase adjustment it might be necessary to switch the setting of the toggle switch (10) in order to invert the phase. Once the signal is locked in to the synchronous signal the LED (3) LOCK-IN situated below the toggle switch **DISPLAY** lights up to indicate this.

Set the bandwidth switch BW/Hz (11) to 50.

Note: in the case of very noisy signals, the bandwidth can be reduced down to 1 Hz.

4.3 Absolute measurements

Feed a sinusoidal signal with 775 mV_{rms} (approx. 1.1 V amplitude) and approx. 2 kHz into (5) **INPUT**. Adjust to 0° using the phase setter (2) **PHASE**. Take a reading at the corresponding scale for this. In addition use the oscilloscope to observe the phase of the synchronous rectifier at **PSD** output (8), see Fig. 4. Switch the toggle switch (2) **DISPLAY** to the right to **GAIN**. The LED **GAIN** in the measuring instrument lights up. Now the gain scales U/dB or U/V apply. Now the pointer of the measuring instrument should point to 0dB.

Schwächen Sie das Signal um 20dB ab. (Viele Funktionsgeneratoren besitzen dazu einen in Stufen schaltbaren Abschwächer). Sie müssen nun die Verstärkung auf 30dB (10dB + 20dB) vergrößern, um wieder zu einer Anzeige von 0dB zu gelangen.

Für absolute Pegelmessungen gelten folgende Meßbereiche:

Voreinstellungen:

GAIN Rechtsanschlag Phase auf 0 abgeglichen

v/dB	Zeiger/dB	Skala	UIN
0	0	3,16	2451 mVrms
10	0	1	775 mVrms
20	0	3,16	245,1 mVrms
30	0	1	77,7 mVrms
40	0	3,16	24,5 mVrms
50	0	1	7,75 mVrms
60	0	3,16	2,45 mVrms
70	0	1	775 μVrms
80	0	3,16	245,1 μVrms
90	0	1	77,7 μVrms
100	0	3,16	24,5 μVrms
110	0	1	7,75 μVrms

Weaken the signal by 20 dB. (Many function generators also possess an additional attenuator which can be switched in steps). Now you have to increase the gain to 30dB (10dB + 20dB), in order to obtain a 0dB reading again.

The following measurement ranges apply for absolute level measurements: Presettings: GAIN far right limit

GAIN far right limit adjust phase to 0

v/dB	pointer/dB	scale	U _{IN}
0	0	3.16	2451 mVrms
10	0	1	775 mVrms
20	0	3.16	245.1 mVrms
30	0	1	77.7 mVrms
40	0	3.16	24.5 mVrms
50	0	1	7.75 mVrms
60	0	3.16	2.45 mVrms
70	0	1	775 μVrms
80	0	3.16	245.1 μVrms
90	0	1	77.7 μVrms
100	0	3.16	24.5 μVrms
110	0	1	7.75 μVrms

4.4 Relative Messungen

Häufig dient der Lock-In Verstärker zur Durchführung relativer Pegelmessungen. Sie können damit z.B. ermitteln, wie groß das **Verhältnis** von Eingangssignal zu Ausgangsignal an einem linearen Vierpol ist. d.h. Dämpfungen messen. In diesem Fall beginnen Sie mit einer Referenzmessung, bei der der Zeigerausschlag mit Hilfe des variablen Verstärkungseinstellers **GAIN** auf 0dB abgeglichen wird. Verstellen Sie während des weiteren Versuchsablaufs die Einstellung dieses Potentiometers nicht mehr.

Hinweis: Schwarze Skalenteile werden negativ gerechnet! (Rote entsprechend positiv)

Beispiel:		
Referenzmessung:	VREF =	0dB, Anzeige mit GAIN auf 0dB abgeglichen
aktuelle Messung:	v =	20dB, Anzeige = 5dB
Dämpfung:	a =	0 - 20 - 5
	=	-25dB

4.5 Der Einfluß von Phasenfehlern auf die Anzeige des Lock-In Verstärkers

Ein durch Fehlabgleich am Potentiometer **PHASE** hervorgerufener Phasenfehler von $\pm 20^{\circ}$ verursacht einen GAIN Fehler von ca. $\pm 0,5$ dB. Der Phasenabgleich ist daher relativ unkritisch durchführbar.

4.6 Überlastverhalten

Übersteuerungen des Vorverstärkers werden durch die LED ④ OVER angezeigt. Sie können das Meßergebnis verfälschen, sind jedoch innerhalb des zulässigen Eingangspannungsbereichs ±10 V für den Lock-In Verstärker unkritisch.

4.4 Relative measurements

The lock-in amplifier often serves to carry out relative level measurements. Here you can, for example, determine how large the **ratio** is from the input signal to the output signal in a linear 2-port, i.e. carry out measurements on attenuations. In this case you start with a reference measurement, at which the pointer deflection is adjusted to 0dB with the aid of the gain setter **GAIN**. This potentiometer setting must be kept for the entire experiment.

Note: black scale segments are considered negative values! (red is correspondingly positive)

Example:

Reference measurement:	VREF	=	0dB,	adjust display reading to 0 dB with GAIN
Current measurement:	v	=	20dB,	display = 5dB
Attenuation:	а	=	0 - 20	- 5
		=	-25dE	5

4.5 The effect of phase errors on the display of the lock-in amplifier

A phase error of $\pm 20^{\circ}$ brought about by faulty setting at the potentiometer **PHASE** causes a GAIN error of approx. ± 0.5 dB. The phase adjustment can therefore be performed with relative ease.

4.6 Overload response

Whenever the preamplifier is overloaded, this is indicated by the LED ④ **OVER**. They can distort the measurement result, but are not critical for the lock-in amplifier within the permissible input voltage range ± 10 V.