

## СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Рассмотрены погрешности измерений рабочих гидравлических характеристик энергетического оборудования электростанций, связанные с нестабильностью изменения (колебания) параметров и выбором дискретности измерений. Приведен анализ математических методов определения интегрального значения параметров при проведении энергетических испытаний оборудования и текущего контроля в системах САУ.*

**Ключевые слова:** погрешности измерений, точность измерений, несинфазность измерений, дискретность сигнала, среднеинтегральное значение.

### Введение

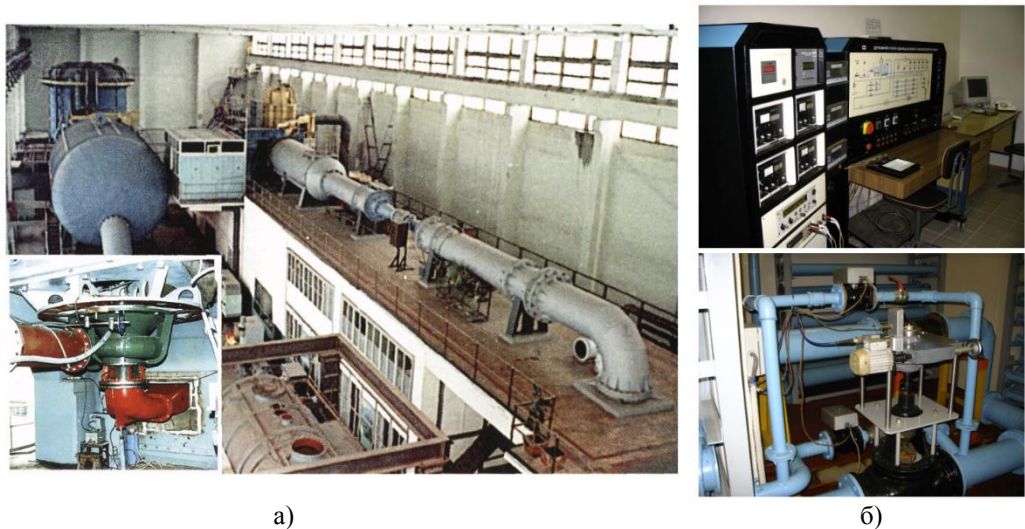
Повышение точности измерения при определении энергетических, технических, экономических и других характеристик технологических объектов является актуальной научно-технической задачей. Решение этого вопроса осуществляется путем комплексного подхода, заключающего в себе применение и усовершенствование методов и методик измерения, перевооружение технического парка измерительной аппаратуры, использование современного математического аппарата и т.д.

С проблемой погрешности (неопределенности) измерений сталкиваются практически все отрасли народного хозяйства и, прежде всего, энергетика, где с одной стороны, требуется высокая точность измерений с целью выявления резервов энергосбережения и оценки энергоэффективных режимов работы энергооборудования, а с другой – невозможность в целом ряде случаев обеспечить приемлемую точность по причине особенностей технологических процессов и характеристик используемых методов и средств измерений. Вышесказанное усложняется ещё и большим количеством измеряемых и контролируемых величин (на ТЭС их количество доходит до 2000, а на АЭС – до 15000) и разнообразием физических процессов, лежащих в основе измеряемого параметра (механика, гидравлика, аэродинамика, термодинамические процессы, электричество, время и др.).

В работах [1, 2] показаны методы снижения погрешности измерения гидравлических параметров гидромашин, обусловленные несовпадением фаз пульсаций параметра и интервала осреднения, конечной частотой опроса датчиков, временным интервалом измерения и выбором математического метода осреднения. Предложенные методы реализованы на гидравлических испытательных стендах (рис. 1.а) гидротурбинной лаборатории ОАО «Турбоатом» (г.Харьков) при проведении испытаний гидравлических машин и в эталонной расходомерной установке РОУ-180 (рис. 1.б) ННЦ «Институт метрологии» (г.Харьков) при градуировки расходомерных устройств [3].

Установки, показанные на рис.1, характеризуются высочайшей степенью точности, совершенными методами и средствами стабилизации потока, современным точным оборудованием. Но даже для таких условий погрешности, описанные в [1] и ниже по тексту, составляют значительную величину. Так, например, погрешность несинфазности может составлять 0,1-0,2% и выше.

Анализ энергетических характеристик [4] и режимов работы гидравлического оборудования электростанций [5], показал, что насосные агрегаты оказывают значительное влияние на эффективность работы энергоблока. Режимы их работы существенно тяжелей, классы точности измерительной аппаратуры на порядок ниже, чем в гидротурбинных лабораториях, амплитуды пульсации напора и расхода – выше. Все это увеличивает величину погрешностей и повышает актуальность их учета и минимизации. В связи с этим, решения, полученные для условий гидротурбинных лабораторий и эталонных расходомерных установок, необходимо использовать на электростанциях при измерении гидравлических параметров насосов, а, при необходимой доработке – и аэродинамических параметров вентиляторов.



а)

б)

Рисунок 1

а) – Гидравлический испытательный стенд ЭКС-100 ОАО «Турбоатом»

б) – Эталонная расходомерная установка РОУ-180 ННЦ «Институт метрологии»

**Изложение основного материала**

**Погрешность несинфазности**

Измеряемый параметр  $X(t)$ , проходящий через измерительный механизм, обладает нестабильностью даже при неизменной настройке регулирующих органов. В гидравлических и аэродинамических системах это вызвано наличием в проточных трактах продольных пульсаций скорости, обусловленных турбулентностью, перемежаемостью и т.п. эффектами.

Наличие этой нестабильности вызывает погрешности измерений параметра, т.к. при несовпадении фаз моментов начала и конца интервала осреднения с периодами пульсаций параметра его осредненная величина  $X_0$ , измеренная с любой точностью, будет отличаться от средней по времени  $X_{cp}$ , т.е.  $X_{cp} - X_0 = \Delta_{нф}$ .

Иллюстрация природы этого явления показана на рис. 2.

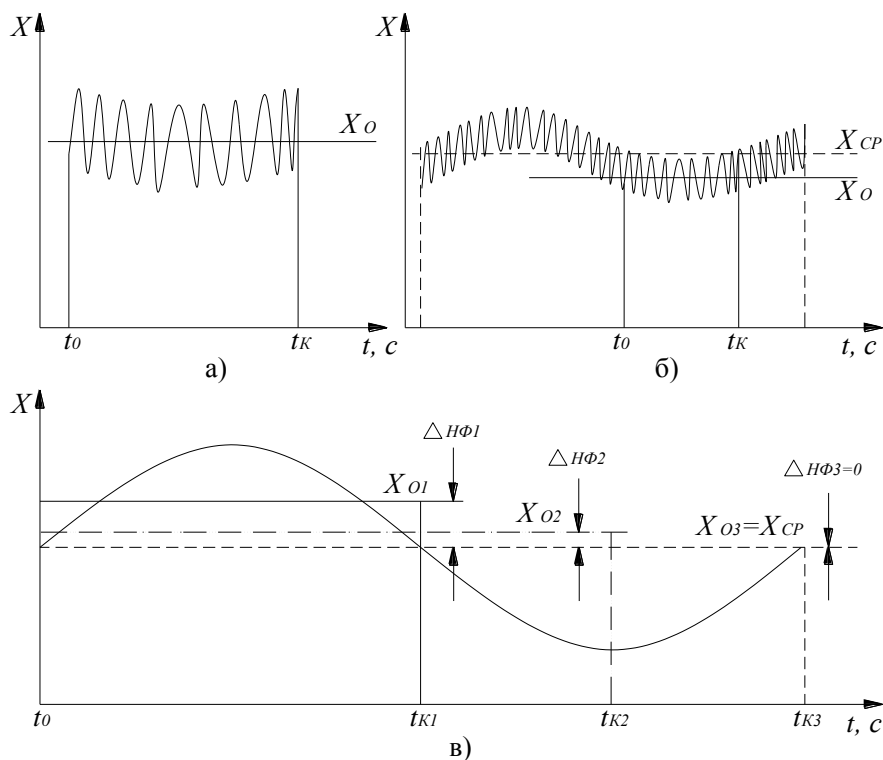


Рисунок 2 – Иллюстрация природы возникновения погрешности несинфазности (а, б) и её зависимости от выбора интервала времени осреднения (измерения)  $T = t_K - t_0$  (в)

Поскольку фаза колебаний параметра, соответствующая началу интервала осреднения, обычно случайна, а интервал осреднения и дискретность измерений не коррелированы со структурой колебаний параметра, эти погрешности также будут случайными величинами.

Для исследования характера и оценки погрешности несинфазности  $\Delta_{\text{нф}}$  пользовались следующей моделью измеряемого параметра:

$$X_{(t)} = X_0 + X \quad (1)$$

где  $X_0$  и  $X$  – постоянная и периодическая переменная составляющие параметра, соответственно. Периодический процесс может рассматриваться как суперпозиция гармонических составляющих, т.е.:

$$X = X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

где  $X_m$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  – амплитуда, круговая частота и начальная фаза колебаний параметра, соответственно. Среднее за время интегрирования  $T$  значение с учетом (1) и (2) представимо в виде:

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt = X_0 - \frac{X_m}{\omega T} [\cos(\omega t + \varphi) - \cos \varphi]$$

При этом относительная погрешность несинфазности  $\delta_{\text{нф}}$  измерения определяется:

$$\delta_{\text{нф}} = \frac{\Delta_{\text{нф}}}{X_{\text{ср}}} = \frac{X_{\text{ср}} - X_0}{X_{\text{ср}}} = \frac{X_m}{X_{\text{ср}}} \cdot \frac{\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)}{\omega T} = A \cdot K, \quad (3)$$

где  $A = \frac{X_m}{X_{\text{ср}}}$  – относительная амплитуда колебаний параметра;

$K = \frac{\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)}{\omega T}$  – фазовый коэффициент.

$\omega$  – круговая частота колебаний параметра, рад/с;  $\varphi$  – начальная фаза колебаний.

Из (3) также следует, что погрешность несинфазности зависит не только от начальной фазы колебаний параметра, но и от относительной амплитуды периодической составляющей  $X_m/X_{\text{ср}}$ , круговой частоты  $\omega$  и времени интегрирования  $T$ .

Характер изменения фазового коэффициента  $K$  от фазы колебаний  $\omega T$  при  $0 < \varphi < \pi/2$  показан на рис. 3 а). Начальная фаза колебаний  $\varphi$  является случайной величиной, поэтому для упрощения расчетов можно положить  $\varphi=0$ , при этом семейство кривых  $K=f(\omega T, \varphi)$  вырождаются в график, представленный на рис. 3 б).

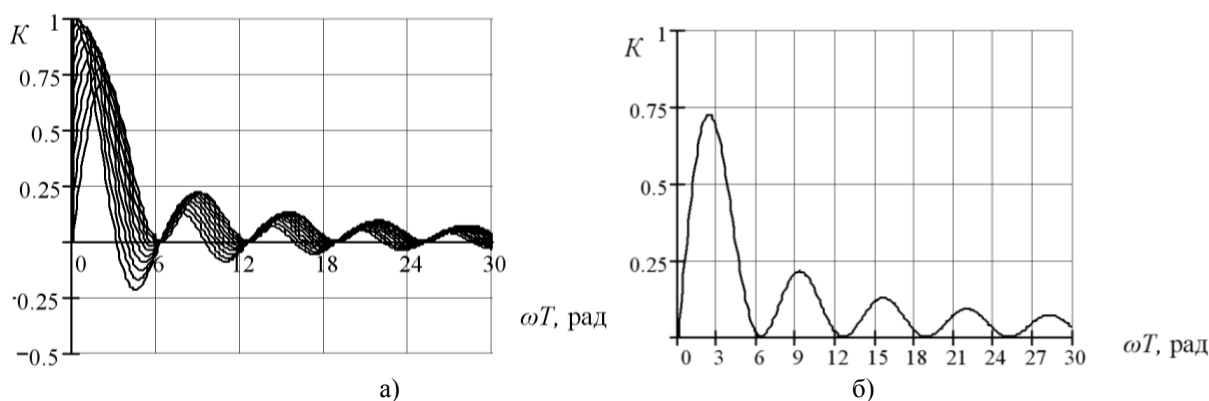


Рисунок 3 – Зависимость  $K$  от  $\omega T$  при  $\varphi = \text{var}$  (а)  $\varphi = 0^\circ$  (б)

На рис. 4 а) представлена погрешность несинфазности  $\delta_{\text{нф}}$ , соответствующая различным значениям относительной амплитуды колебаний  $A$  и фазы колебаний  $\omega T$  параметра. Зная частоту низкочастотных колебаний параметра, к примеру, из показаний измерительных приборов, можно определить искомое минимальное время осреднения с целью обеспечения требуемой погрешности измерения (рис. 4.б).

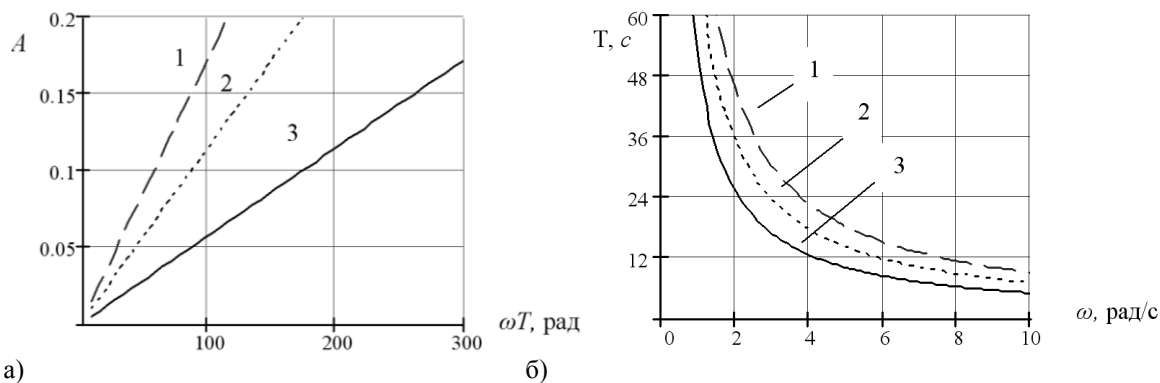


Рисунок 4 – а) Погрешность несинфазности  $\delta_{\text{нф}}$ , соответствующая различным значениям относительной амплитуды колебаний параметра  $A$  и фазы колебаний  $\omega T$  (1 – соответствует  $\delta_{\text{нф}}=0,3\%$ , 2 – соответствует  $\delta_{\text{нф}}=0,2\%$ , 3 – соответствует  $\delta_{\text{нф}}=0,1\%$ ) б) Зависимость времени интегрирования от частоты колебаний параметра (1 – соответствует  $\omega T=90$ ; 2 – соответствует  $\omega T=70$ ; 3 – соответствует  $\omega T=50$ )

Погрешность измерения среднего значения параметра, связанная с несинфазностью осреднения, как функция времени  $t$  может быть определена в соответствии с выражением:

$$\delta_{\text{нф}}(t) = \left| \frac{\frac{1}{t} \sum_{k=1}^n X_k - X_0}{X_0} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

Здесь  $X_k = X_{k(t)}$  – текущее значение параметра;  $t=n \cdot h$  – переменная величина времени осреднения параметра, меняющаяся от  $h$  до  $T$ ;  $n$  – переменная, меняющаяся от 1 до  $M$ , где  $M$  – количество измерений параметра в эксперименте;  $h$  – дискретность измерений;  $T$  – продолжительность измерений;  $X_0$  – осредненное значение параметра при  $t=T$  и  $n=M$ .

На рис. 5 а) представлена экспериментально полученная зависимость погрешности  $\delta_{\text{нф}}$ , обусловленная несинфазностью осреднения расхода, от времени измерения  $t$ , на эталонной расходомерной установке РОУ-180 ННЦ «Институт метрологии». На рис. 5 б) показана та же зависимость, что и на рис. 5 а), но построенная по формуле (1). Кривая 1 соответствует погрешности при колебаниях расхода с частотой, равной максимальной из разложения Фурье ( $\omega_{\text{max}} = 0,8616$  рад/с). Кривая 2 учитывает самые низкочастотные пульсации расхода в установке ( $\omega = 0,033$  рад/с), она же, по-видимому, и объясняет всплески погрешности на экспериментальной зависимости.

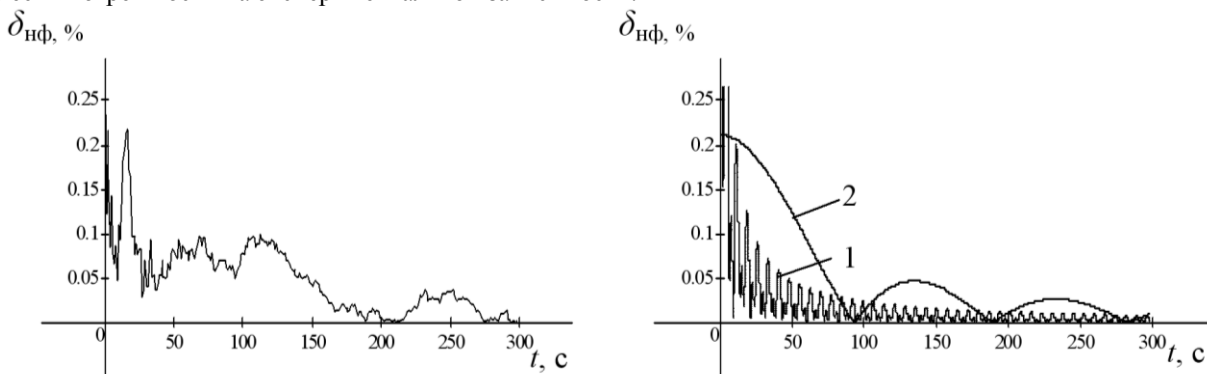


Рисунок 5 – Экспериментальные (а) и теоретические (б) исследования погрешности несинфазности в эталонной расходомерной установке РОУ-180

#### Погрешность дискретизации

Восстановление характера изменения параметра во времени происходит по дискретным показаниям измерительных устройств, что вызывает дополнительную погрешность измерений.

В [1] показано, что максимальная относительная погрешность аппроксимации определяется:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{1}{6} \frac{y''(t_0) \tau^2}{y(t_0)} \quad (5)$$

Откуда интервал измерения:

$$\tau = \sqrt{\frac{6\Delta_{\max}}{X''(t_0)}} = \sqrt{\frac{6\delta_{\max} X(t_0)}{X''(t_0)}}$$

Величина погрешности дискретизации определяется как характером колебаний параметра (вторая производная по времени), так и частотой опроса датчиков (величина, обратно пропорциональная интервалу времени между измерениями).

Тогда для гармонически изменяющегося параметра необходимая частота опроса датчика составит:

$$f_D = \frac{1}{\tau} = \omega \sqrt{\frac{X_m}{6\delta_{\max} X_{cp}}} = \omega \sqrt{\frac{A}{6\delta_{\max}}}, \quad (6)$$

**Погрешность математического аппарата расчета среднего значения параметра**

На сегодняшний день на многих измерительных установках интегральное значение параметра определяется среднеарифметическим методом:

$$X_{cp} = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M X_i \quad (7)$$

При сравнительной оценке погрешностей алгоритмов осреднения, целесообразно остановиться на обобщенном методе Симпсона, предложенным профессором Литвиным О.Н. [6], и на параболическом сплайне.

Интегральное значение измеряемой величины по классической формуле Симпсона может быть выражено в виде:

$$X_{Симп} = \left(\frac{\tau}{3T}\right) \cdot \left[ X_0 + X_M + 4 \sum_v X_v + 2 \sum_k X_k \right],$$

где  $v$  – нечетные значения  $X$ ;  $k$  – четные значения  $X$ ;

$X_M$  – конечное значение параметра при  $t=T$ .

Интегральное значение расхода, определяемое по обобщенной формуле Симпсона, может быть выражено в виде:

$$X_{об.Симп} = \left(\frac{\tau}{T}\right) \left[ X_0 \left[ \frac{1}{2} - \frac{\tau}{12}(M-1) \right] + X_1 \left[ \frac{5}{6} + \frac{\tau}{12}[3(M+1)-7] \right] + \right. \\ \left. + \sum_{p=1}^{q-1} X_{2p} \cdot \left[ \frac{4}{3} - \frac{\tau}{3}(M-2p) \right] + \sum_{p=2}^{q-1} X_{2p-1} \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{\tau}{3}(M+1-2p) \right] + X_M \left( \frac{1}{3} + \frac{\tau}{12} \right) \right] \quad (8)$$

где  $p$  – переменная, меняющаяся от 0 до  $\frac{M}{2}-1$ ;  $q = \frac{M+1}{2}$ .

Линейный сплайн:

$$X_{ЛС} = \frac{1}{T} \left[ \sum_{k=0}^M \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[ X_k \frac{t-(k+1)\tau}{-\tau} + X_{k+1} \frac{t-k\tau}{\tau} \right] dt \right] \quad (9)$$

Параболический сплайн:

$$X_{ПС} = \frac{\tau}{T} \left[ \frac{X_1}{2} + \sum_{k=2}^{M-1} X_k + \frac{X_M}{2} - \sum_{u=1}^{M-1} V_{u,u+1} \cdot \frac{\tau^2}{12} \right] \quad (10)$$

где  $V_{u,u+1} = \frac{2(-1)^u}{\tau^2} \sum_{k=2}^{u-1} [(-1)^k (X_{k+1} - 2X_k + X_{k-1})] + (-1)^{u-1} V_{12}$ ;

$$V_{12} = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{M-2} [(-1)^{k-1} \cdot (X_{k+2} - 2X_{k+1} + X_k)(M-k-1)].$$

Зависимость погрешности измерений параметра в случае, когда его интегральное значение определено по обобщенной формуле Симпсона от относительной частоты опроса датчиков  $f' = 2 \pi \omega / f_D$  представлена на рис. 6 а), а на рис. 6 б) показана подобная зависимость, но при использовании параболического сплайна.

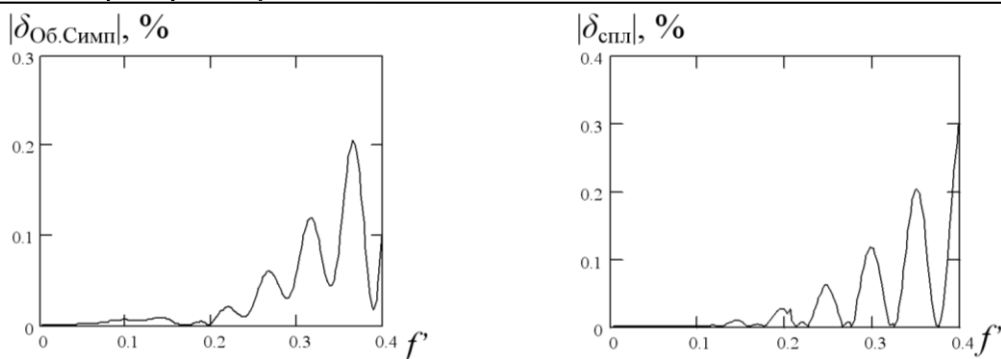


Рисунок 6 – Сравнение точности определения средних значений параметра

Анализ показывает, что при относительной частоте колебаний параметра  $f' \leq 0,2$  погрешность определение среднеинтегрального значения, обусловленная дискретностью измерений, имеет минимальное значение при использовании обобщенного метода Симпсона и метода сплайна, в то время как при  $f' \geq 0,2$  точность метода линейной аппроксимации удовлетворительна [1].

Измерения гидравлические параметры (расход, напор, давление) лежат в основе определения энергетических характеристик всех насосов, являющимися основными потребителями собственных нужд электростанций. Периодические тепловые процессы, протекающие в теплоэнергетическом оборудовании станции характеризуются большой инерционностью, что увеличивает погрешность несинфазности. Электромагнитные процессы протекают быстро, что повышает необходимость учета дискретизации и выбора метода осреднения.

С целью определения условий получения экспериментальных данных и их объема, гарантирующих достижение результатов с приемлемым минимумом погрешности, разработан программный модуль, интерфейс которого приведен на рис. 7. Модуль встраивается в общую программу САУ и/или АСУ ТП электростанций.

Модуль определяет: 1. необходимое время проведения испытаний (измерений), при котором погрешность несинфазности будет равна заданной; 2. необходимую частоту опроса датчика, при которой погрешность дискретизации будет равна заданной; 3. среднее значение параметра по методу линейной аппроксимации и обобщенному методу Симпсона.

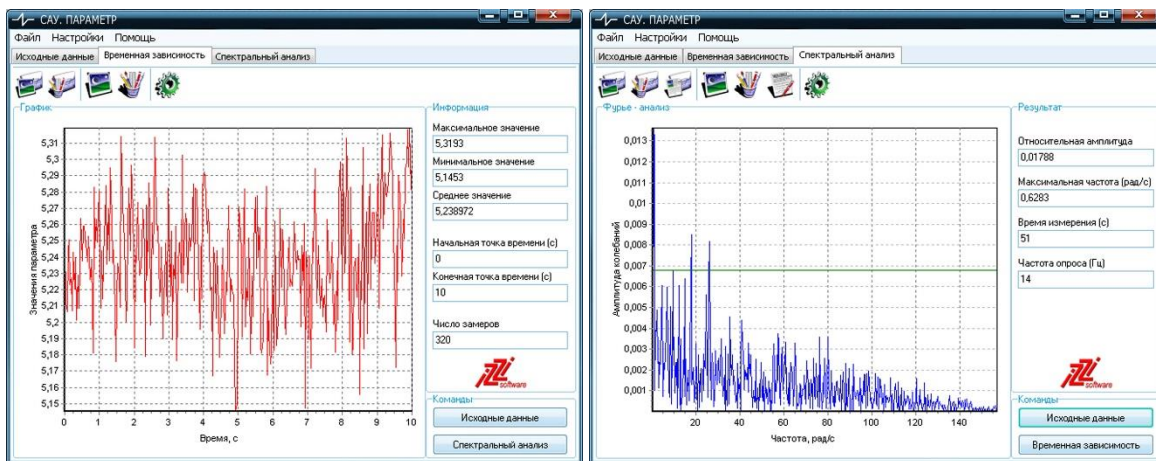


Рисунок 7 – Интерфейс программного модуля САУ по определению характеристик проведения эксперимента и расчету средних значений параметров объекта управления

**Выводы.** 1. Показана методика определения погрешности несинфазности, погрешности дискретизации и погрешности определения среднего значения гидравлических параметров, которая может быть использована при измерениях гидравлических характеристик технологических объектов электростанций. 2. Представлен программный модуль, позволяющий гарантировать достижение результатов с приемлемым минимумом погрешности и который может входить в общее программное обеспечение САУ объектов электростанций.

**Список использованной литературы:**

1. Мезеря А.Ю. Удосконалення методів та підвищення точності засобів контролю параметрів моделей гідравлічних машин: [дисертація] / дисертація на здобуття наукового ступеня к-та техн. наук: спец. 05.11.03 / А.Ю. Мезеря. –Харків. –2005. –181с.

2. Артюх С.Ф. Совершенствование методов повышения точности средств контроля параметров моделей гидравлических машин [Текст]: [монография] / С.Ф. Артюх, А.Ю. Мезеря // Украинская инженерно-педагогическая академия. –Х.: НТМТ. –2009. –158с.

3. Большаков В.Б. Снижение погрешностей измерения характеристик моделей гидравлических машин / В.Б. Большаков, А.Ю. Мезеря // Праці IV Міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка” (Метрологія-2004). –Харків: –2004. –Т.2. –С. 226-230.

4. Мезеря А.Ю. Экспериментальные исследования эффективности автоматизированного энергосберегающего управления циркуляционными насосами электростанций / Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Лаптинов И.П., Бабенко И.А., Князева В.Н. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. –№9(140). –2015. –С.36-42. ISSN 2218-1849.

5. Канюк Г.И. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике [Текст] / Канюк Г.И, Артюх С.Ф., Мезеря А.Ю., Лаптинова Е.В., Мельников В.Е. –Харьков: Изд-во «Точка». –2013. –140 с. Русс. яз. ISBN 978-617-669-065-8

6. Литвин О.Н. Про один метод обчислення енергетичних характеристик моделей гідромашин / Артюх С.Ф., Литвин О.Н., Мезеря А.Ю., Бабенко К.Е. // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. –Харків: НТУ “ХПИ”. –2004. –Т.1. –С. 126-130.

**A. Mezerya**

**Ukrainian engineer-pedagogical academy**

### **REDUCTION TO INACCURACY OF THE MEASUREMENTS OF THE HYDRAULIC FEATURES OF THE ENERGY EQUIPMENT OF POWER PLANT STATION**

*Considered inaccuracy of the measurements worker hydraulic features of the energy equipment power plant station, connected with instability of the change (the fluctuations) parameter and choice discrete measurements. The brought analysis of the mathematical methods of the determination of integral importance parameter when undertaking the energy test the equipment and current checking in system SAU.*

**Keywords:** inaccuracy of the measurements, accuracy of the measurements, unphase measurements, дискретность signal, averageintegral importance.

#### **References**

1. Mezerya A.Y. The improvement of the methods and increasing to accuracy of the facilities of the checking parameter models of the hydraulic machines: [thesis] / thesis on competition scientific degree candidate of the technical sciences: profession 05.11.03 / A.Y. Mezerya. -Kharkov. -2005. -181p.

2. Artyukh S.F. The improvement of the methods of increasing to accuracy of the facilities of the checking parameter models of the hydraulic machines [Text]: [monograph] / S.F. Artyuh, A.Y. Mezerya // Ukrainian engineering-pedagogical academy. -Kharkov: NTMT. -2009. -158p.

3. Bolshakov V.B. The reduction of inaccuracy of the measurement of the features of the models of the hydraulic machines / V.B. Bolshakov, A.Y. Mezerya // IV international science conference "Metrology and measuring technology" (Metrology -2004 - Kharkov: -2004. -Т.2. -P. 226-230.

4. Kanyuk G.I. The experimental studies to efficiency automated energy-save management циркуляционными pump of power plant station / Kanyuk G.I., Mezerya A.Y., Laptinov I.P., Babenko I.A., Knyazeva V.N. // Energy-save, energy, energy-audit. # 9(140) -2015. -P.36-42. ISSN 2218-1849.

5. Kanyuk G.I. The scientific principles energy-save in heat and atomic energy [Text] / Kanyuk G.I., Artyuh S.F., Mezerya A.Y., Laptinova E.V., Melnikov V.E. - Kharkov: “Point” -2013. -140 p. ISBN 978-617-669-065-8

6. Artyuh S.F. About one method of the calculation of the energy features of the models hydraulic machines / Artyuh S.F., Litvin O.N., Mezerya A.Y., Babenko K.E. // Vesnik Nacionalnogo tehchnogo universitetu “Kharkivskiy politehnichniy institut” - Kharkov: NTU “HPI” -2004. -Т.1. -P. 126-130.

УДК 621.22.018.8

**А. Ю. Мезеря**, канд. техн. наук, доц.

**Українська інженерно-педагогічна академія**

### **ЗНИЖЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРУ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

*Розглянуто похибки виміру робочих гідравлічних характеристик енергетичного обладнання електростанцій, пов'язані з нестабільністю зміни (коливання) параметрів і вибором дискретності виміру. Наведено аналіз математичних методів визначення інтегрального значення параметрів при проведенні енергетичних випробувань обладнання й поточного контролю в системах САК.*

**Ключові слова:** похибки виміру, точність виміру, несінфазність виміру, дискретність сигналу, середнінтегральне значення.

Надійшла 23.03.2016

Received 23.03.2016