

ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ В ПРОЦЕССЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

ВОЙЦЕХ БАТКО

Stanislaw Staszic University of Mining and Metallurgy, Krakow, Poland

e-mail: batko@uci.agh.edu.pl

В работе рассматривается решение задачи фильтрации и предсказания колебательных сигналов в системах вибрационного мониторинга гидродинамических подшипников турбомшины, обуславливающих оценку их надежности.

Искомая структура фильтра-предикатора базируется на решении уравнений Кальмана-Бизи. Определяют ее стохастические уравнения движения цапма вала вокруг статического положения равновесия, связанные с наблюдением мониторируемых колебаний.

Представление исполнительской идеи дополнено результатами моделирования прототипа фильтра, выполненного на сигнальном процессоре в среде программы MATLAB.

1. Введение

Задачи раннего предсказания неисправностей работы машины пополняют существующие решения систем, мониторирующих их состояние. В случае высокооборотных машин, расположенных на подшипниках скольжения, это чаще всего решения мониторинга колебаний цапма вала во вкладыше подшипников. Постоянные измерения перемещений цапма вала в двух взаимоперпендикулярных направлениях, соотносимых к критериальным значениям, определяют оценку динамического состояния машины. Их результаты могут служить сигналом неисправности узла подшипника или же генерировать выключение машины. Одновременно анализ кривых Лисаю [8], проходящих через ось цапма вала, является лучшим признаком возможных неисправностей функционирования мониторируемого подшипникового узла, приводящих к его повреждению. Так, эффективное функционирование систем мониторинга обусловлено процессом правильного контроля колебаний цапма вала во вкладыше подшипника скольжения, а также связанным с ним процессом оценки мониторируемых диагностических сигналов. Реализацию таких ожиданий определяют существующие в них фильтрационные решения, обеспечивающие исключение, возникающих в процессе мониторинга помех. Направления имеющихся решений в указанной области определялись реализациями, основанными на алгоритмах основных техник по переработке сигналов из группы методов:

- усреднений контролируемых сигналов,
- ортогонализации измерительных сигналов и связанной с ней диагностической квантификации,
- адаптационной и частотной фильтрации.

Ограниченная полезная способность большинства из них вытекает из их недостаточной универсальности. Это связано с неполной возможностью оценки их положений, не учитывающих физической сущности анализируемых явлений. Итак, целесообразны поиски исполнительских модификаций вышеприведенных задач, обеспечивающих правильное функционирование в системах мониторинга при разных возможных помехах.

В статье приведены результаты исследований автора в данной области, а также новые результаты, изложенные в публикации [2-5]. Они обращаются к модельным описаниям, к генерированию контролируемых диагностических сигналов в гидродинамических подшипниковых узлах.

Стохастический подход (в смысле Ito) при использовании уравнений мониторируемых траекторий создает базу, свойственную модели фильтра Кальмана-Бизи в ее классическом [6] или обобщенном [1] видах. Такой подход обеспечивает эффективное прикладное решение фильтрации и связанной с ней минимально-квадратной оценки контролируемых диагностических сигналов вместе с оценкой возможных ошибок полученных решений

2. МОДЕЛЬНАЯ АБСТРАКЦИЯ ПРОЦЕССА ИСКЛЮЧЕНИЯ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИРОВАНИЯ, ФОРМУЛИРОВАННАЯ НА ЯЗЫКЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В процессе мониторинга колебательного режима узлов подшипников возникают разного рода помехи с определенными статистическими характеристиками. Так, правильная оценка значений мониторируемых диагностических сигналов требует фильтрации помех, накладывающихся на наблюдения контролируемых диагностических сигналов. С реализацией таких задач связан вопрос выбора соответствующей модельной абстракции, описывающей соотношения между оцениваемым процессом \underline{x}_t и его проекцией \underline{y}_t , данной возмущенными измерительными результатами. Его формализация должна обеспечить анализ двухразмерных стохастических процессов $(\underline{x}_t, \underline{y}_t)$, из которых лишь одна составляющая \underline{y}_t подвергается наблюдению. На основе измерения процесса \underline{y}_s с постоянным временем $\{y_s, 0 \leq s \leq t\}$ или же ряда времени $\{y_0, y_1, y_2, \dots, y_n\}$ в случае процесса с дискретным временем надо конструировать фильтр неподлежащей наблюдению составляющей \underline{x}_t рассматриваемого процесса.

Основная задача фильтрации имеет простое теоретическое решение, при котором наилучшим среднеквадратным фильтром переменной \underline{x} является угловое ожидаемое значение $m_t = E[\underline{x}_t | \underline{y}_t]$. Это значение можно рассчитать с помощью формулы решения Гейса. Однако уже при относительно простых распределениях, рассчитанные таким образом значения определяются сложными расчетными формулами, что, в свою очередь, осложняет как практические их использования, так и анализ структуры и особенностей полученных эстиматоров, контролируемых в процессе диагностирования сигналов состояния.

Явное и эффективное решение вопроса фильтрации обеспечивает фильтр Кальмана-Бизи [6] при предположении, что распределение процесса $(\underline{x}, \underline{y})$, нормально.

Его конструкция основана на положении, что процесс $(\underline{x}, \underline{y})$, генерируется стохастическим дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} d\underline{x}_t &= A\underline{x}_t + W_t + dv_{1t}, \underline{x}_0 = \underline{x} \\ d\underline{y}_t &= H\underline{x}_t + dv_{2t}, \underline{y}_0 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

в котором:

- \underline{x}_t -неподвергающийся наблюдению вектор состояния мониторируемой системы,
- \underline{y}_t -вектор контрольных наблюдений,
- W_t - вектор вынуждений, воздействующих на систему,
- v_{1t}, v_{2t} - пара независимых процессов Винера.

Кроме того предполагается, что детерминистические матрицы A, H , а также $\underline{x}_0 = \underline{x}$ известны наблюдателю.

Решение так поставленной задачи требует отнесения принятой математической абстракции к диагностической модели контролируемого процесса. Это обозначает необходимость представить диагностическую интерпретацию для матрицы A, H, W (т.е. структурных соотношений между отдельными членами принятой модели), а также возмущающих процессов v_{1t}, v_{2t} .

3. ОПТИМАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ В ПРОЦЕССЕ МОНИТОРИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ УЗЛОВ ПОДШИПНИКОВ

Задача исключения помех в системе мониторинга колебаний цаппа вала во вкладыше гидродинамического подшипника может рассматриваться с точки зрения измерительной системы, совершающей наблюдения поведения динамической системы „цамп-вкладыш-внешнее укрепление” [2], представляющей собой часть динамической системы ротор – подшипники – опоры – фундамент. Ее вероятностная структура определяется возникающими в ней помехами, связанными с шумами в измерительной траектории, а также воздействием факторов, не учитывающихся в модельном описании. Следовательно, в осуществляемой системой мониторинга контрольной задачи имеем дело с полезным сигналом и помехами с определенными статистическими свойствами.

При таком подходе к вопросу отыскания алгоритма, реализующего оптимальную фильтрацию помех, возникающих в системе мониторинга, можно воспользоваться решениями теории сигналов, описываемых стохастическими дифференциальными уравнениями в понимании Кальмана-Бизи [6], а также ее обобщениями.

Примерной базой для реализации таких ожиданий, приводящей к исключению помех в системах мониторинга могут служить уравнения, описывающие колебания цаппа упругого вала около положения равновесия. Они определяют наблюдаемые в системе мониторинга траектории колебаний цаппа вала в системе координат, определенных положением измерительных датчиков вкладыша подшипников.

Разные варианты описания указанной проблемы, связанные с применением свойственных ему математических формализмов и их программных эквивалентов, позволяющих проектировать и анализировать динамические поведения произвольных конструкций узлов подшипников, служили объектом исследований Е. Кициньского. Они рассматриваются в его монографии [7] и приложенной к ней библиографии его многочисленных публикаций, обсуждающих: математические модели динамики таких систем, алгоритмы числового анализа, а также симуляционные иллюстрации, связанные с их практическим применением.

Для представления исполнительной идеи решений процесса исключения помех в системах мониторинга колебания цапфа в гидродинамических подшипниках воспользуются его упрощенной линейной моделью [8], приведенной на рис.1. Он определяется системой неуравновешенного податливого ротора с упругостью c , безмассового, симметричного с массой сосредоточенной в центре, опирающегося на два одинаковых подшипника скольжения.

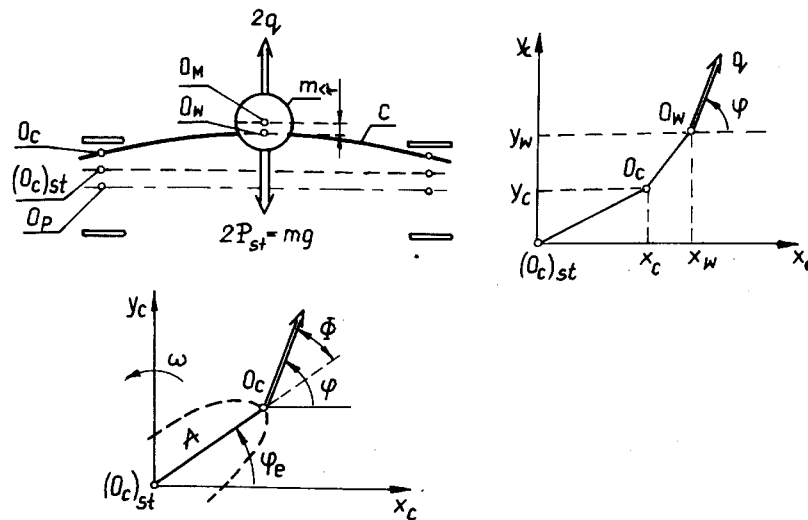


Рис. 1 Модель системы „ротор – подшипник” [8].

При таком подходе уравнения движения центра массы ротора O_w принимают вид:

$$\begin{aligned} -m\ddot{x}_w - c(x_w - x) + 2q_x &= 0 \\ -m\ddot{y}_w - c(y_w - y) + 2q_y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

следовательно, описание движения цапфа вала около устойчивого положения равновесия (вкладыша гидравлического подшипника) представляется зависимостями:

$$\begin{aligned} 2\Delta W_x - c(x_w - x) &= 0 \\ 2\Delta W_y - c(y_w - y) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где:

- x_w, y_w - координаты движения центра ротора
- x, y - координаты движения центра цапфа
- q_x, q_y - составляющие внешней нагрузки, обусловленные неуравновешенностью
- $\Delta W_x, \Delta W_y$ составляющие прироста динамической реакции смазочного слоя подшипников скольжения представляются соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta W_x &= W_x - (W_x)_M = c_{11}x + c_{12}y + d_{11}\dot{x} + d_{12}\dot{y}; \\ \Delta W_y &= W_y - (W_y)_M = c_{21}x + c_{22}y + d_{21}\dot{x} + d_{22}\dot{y}; \end{aligned} \quad (4)$$

определенные коэффициенты жесткости и демпфирования d_{ik} смазочного слоя.

Исходя из вышеприведенных уравнений, преобразованных к безразмерным переменным, определенных безразличным временем $\tau = \omega t$ связанным с угловой скоростью ротора ω [rad/s], а также перемещениями центра

$\left[X = \frac{x}{\Delta R}, Y = \frac{y}{\Delta R} \right]$ цапфа, отнесенными к радиальному зазору ΔR , получаем уравнение:

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + W + \Xi \quad (5)$$

Оно описывает с точностью до некоторого гауссовского процесса Ξ динамику поведений мониторируемого узла подшипника, определенную вектором состояния $\underline{x} = \text{col}[X, \dot{X}, \ddot{X}, Y, \dot{Y}, \ddot{Y}]$

Выступающие при его описании матрицы A и W имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_{11} & \Omega & \lambda_{11} & k_{12} & \Omega & \lambda_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_{12} & \Omega & \lambda_{21} & k_{22} & \Omega & \lambda_{22} \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_x \\ 0 \\ 0 \\ Q_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

Коэффициенты k_{ij} , λ_{ij} связаны с коэффициентами жесткости c_{ik} и демпфирования d_{ik} смазочного слоя соотношениями, свойственными при сведении к безразмерному виду, а также преобразованиями соотношений (2) и (3) в (5).

Параметр $\Omega = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2$ постоянная отнесения, связанная с вышеуказанными преобразованиями, в

которой $\omega = \sqrt{\frac{g}{\Delta R}}$, а $\mu = \frac{f}{\Delta R}$ относительная эластичность ротора Q_x , Q_y составляющие вращающей силы, вызванной радиусом неуровненности и вышеприведенными преобразованиями. Принятая модель состояния $\underline{x} = \text{col}[X, \dot{X}, \ddot{X}, Y, \dot{Y}, \ddot{Y}]$ мониторируемого процесса колебаний цаппа наблюдается с гауссовскими измерительными помехами Ψ с помощью выбранных составляющих вектора

$$\begin{aligned} z &= \text{col}[X, 0, 0, Y, 0, 0]: \\ \underline{y} &= H\underline{x} + \Psi \end{aligned} \quad (7)$$

Так формализованное описание контроля мониторируемых диагностических сигналов (7) и их механизмов генерирования (6) характерно уравнениям, генерирующим решение на вид оптимального фильтра-предикатора Кальмана.

Выступающие при принятом описании матрицы Ξ , Ψ , H представляются зависимостями:

$$\Xi = \sigma \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \text{white noise} \\ 0 \\ 0 \\ \text{white noise} \end{pmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Psi = \rho \begin{bmatrix} \text{white noise} \\ \text{white noise} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Искомое уравнение фильтра Кальмана для мониторируемых диагностических сигналов принимает вид:

$$d\hat{\underline{x}}_t = A\hat{\underline{x}}_t dt + \frac{R(t)H^T}{\rho^2} [d\underline{y}_t - H\hat{\underline{x}}_t dt] + F(t)dt \quad (9)$$

где:

$R(t)$ - решение матричного уравнения Риссати

$$\dot{R}(t) = \sigma^2 I + AR + RA^T - RH^T \frac{1}{\rho^2} HR \quad (10)$$

определяющего ошибку оценки:

$$R(t) = E \left\{ \left[\hat{x}_t - x_t \right] \left[\hat{x}_t - x_t \right]^T \mid \Gamma_t \right\} \quad (11)$$

определенную во множестве Γ_t наблюдений $\{y_t=x, y_t=y\}$ из диапазона $(0, t)$. Они определяют вид алгоритма для модуля, осуществляемого процесс фильтрации помех контролируемых колебаний цапма вала во вкладыше подшипника системой мортирования.

4. ПРОВЕРОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные данные для верификации предложенного метода получены на многогабаритном исследовательском стенде роторной машины, расположенной на подшипнике скольжения, находящемся в Институте гидромашин ПАН в Гданьске []. Этот объект был выбран из-за хорошего знания его модельных параметров, возможности простой реконфигурации измерительных инструментов, состоявших из разного рода датчиков, а также в результате отсутствия осевых совмещений ротора.

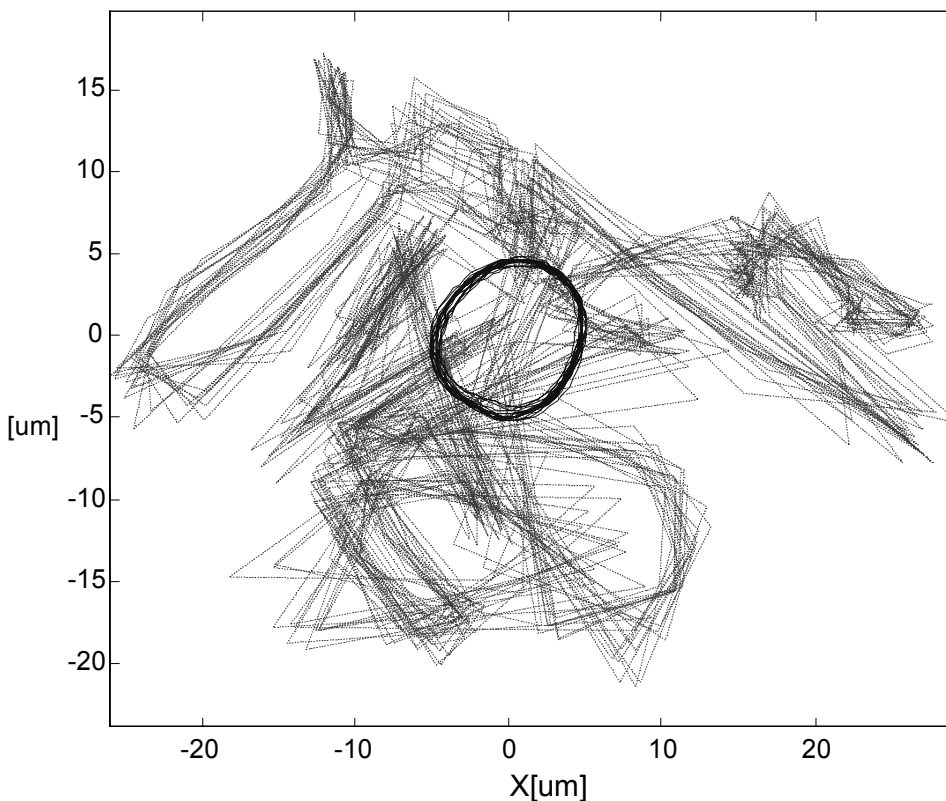
Измерялись и фиксировались траектории движения цапма ротора во вкладыше подшипника при вращательных скоростях меньших критической. В ходе измерений исследовательский объект был построен в виде двухопорного ротора, расположенного на подшипнике скольжения, приводимого в движение электрическим двигателем.

С помощью датчиков перемещения измерялись и фиксировались в двух взаимоперпендикулярных осях цапма вала относительно вкладыша для двух подшипников. Они служили базой отнесения для оценки функциональных особенностей предложенного метода.

Проект фильтра Калмана изготовлен в расчетной среде Matlab-Simulink. В этой среде проведена и симуляция действия построенного фильтра для данных моделированной роторной машины, а также для ранее зафиксированных сигналов перемещений цапма вала в гидродинамическом подшипнике.

В качестве программного обеспечения при анализе функционирования фильтра в реальном времени была использована карта фирмы dSPACE, содержащая сигнальный процессор TMS320C40, аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, позволяющие сотрудничать с расчетным пакетом Malta-Simulink.

Проверка принятого метода фильтрации помех, совершаемая как на этапе симуляции, так и в ходе эксперимента базировала на сопоставлении полученных результатов с траекториями из числовых расчетов одномассовой симметричной модели ротора, расположенного на подшипнике скольжения, основанной на методе конечных элементов, разработанном в Институте гидромашин ПАН в Гданьске. Результаты Фильтрации приведены на рис. 2.



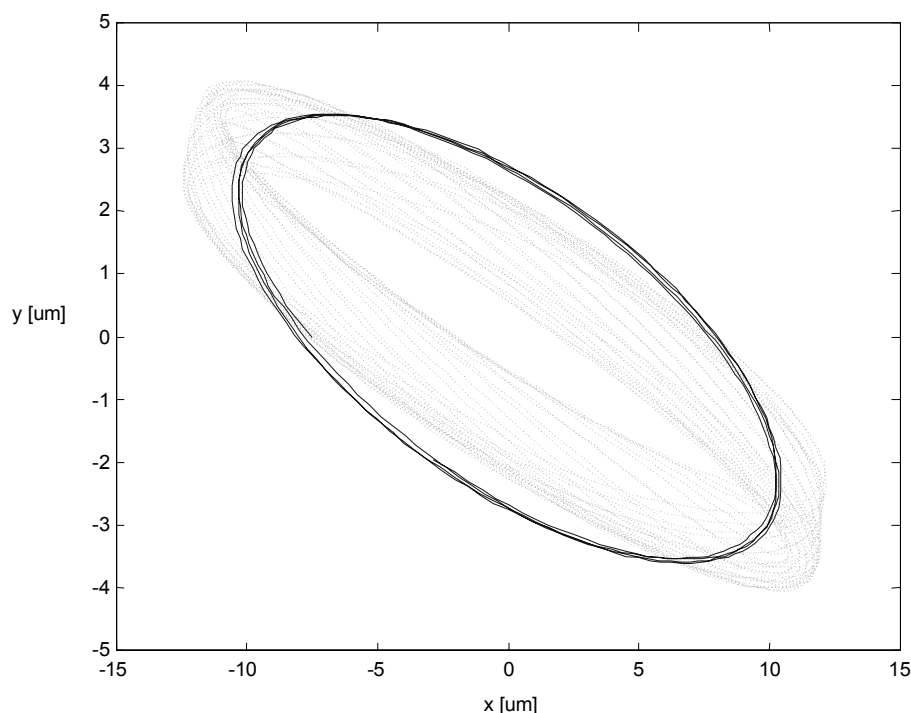


Рис. 2. Результаты Фильтрации gun-out методом фильтра Каальмана

В верхней части рисунка видна отфильтрованная траектория оси цапма вкладыша гидродинамического подшипника (сплошная линия) на фоне сигналов от датчиков представляемых штриховой линией с вращательной скоростью 1900 об/мин и радиусом неуровнешенности 15 μm

Нижняя часть рисунка изображает траекторию, полученную после фильтрации в течение 16 очередных оборотов ротора со скоростью 4000 об/мин, при которой начинается стадия потери устойчивости.

5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Представленные обсуждения, касающиеся вопроса исключения помех в процессе мониторинга колебаний цапма вала во вкладыше подшипников скольжения, объясняют принятое направление поисков эффективных инструментов фильтрации помех для систем мониторинга.

Подчеркивается необходимость совершенствования применяемых в диагностике машин решений для получения новых измерительных приемов, соответствующих исследуемым процессам.

Они соответствуют уровню развития методов анализа сигналов, связанных с разработкой новой технологии сигнальных процессоров, определяя место будущих их внедрений в системах мониторинга.

Характерным для такого подхода к моделированию является свойство оптимальности процесса фильтрации сигнальных помех. Существенным его преимуществом служит цифровая простота реализации, а также возможность оценки ошибок процессов фильтрации.

Литература

- [1] Banek T.: Optymalna filtracja i predykcja sygnałów opisywanych stochastycznymi równaniami różniczkowymi. Wyd. Uniwersytetu M. Curie-Skłodowskiej – Lublin 1990.
- [2] Batko W. Banek T.: Noise filtering in monitoring system. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 1993, Vol. 3 nr.p.509-517.
- [3] Batko W. Banek T.: Nowe rozwiązania filtracyjne i predykcyjne w systemach drganiowego monitoringu stanu łożysk ślizgowych. ZN AGH. S Mechanika, t.13 z. 1 1994 s.33-45
- [4] Batko W.: Optymalna filtracja zakłóceń w procesach estymacji składowych harmonicznym widm drgań monitorowanych sygnałów diagnostycznych. (przygotowana do druku)
- [5] Batko W. Banek T.: Filtration of the noise generated by shaft neck contour deformations in monitoring system. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 1996, Vol. 6 nr 4 ,pp.101-103

- [6] Kalman R.E. Bucy R.S.: New results in Linear Filtering and Prediction Theory. *Jurnal of Basic Engineering*. 1960, vol.82.
- [7] Kiciński J.: Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych. Monografia. Wyd. Ossolineum, Wrocław 1995
- [8] Kiciński J.: Nowe modele i programy komputerowe do określania statycznych i dynamicznych własności poprzecznych łożysk ślizgowych. ZN IMP PAN nr291/120/1989 i nr 317/1244/1990.
- [9] Kiciński J.: Symptomy diagnostyczne turbozespołów energetycznych określone metodą komputerowej i analogowej symulacji ich defektów. Mat II Seminarium Wibroakustyka turbozespołów energetycznych. Gdańsk 1994, s 51-92
- [10] Lipcer R.S., Szirajew A.N.: Statystyka procesów stochastycznych. Wyd pol. PWM 1991