

УДК 621.8:519.6:004

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОБРАБОТКУ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Ю.П. АСЛАМОВ, А.П. АСЛАМОВ, И.Г. ДАВЫДОВ, А.В. ЦУРКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 октября 2017

Аннотация. Оценка технического состояния роторного оборудования по вибрационным сигналам традиционно является важной задачей в практике его производства и эксплуатации. На современном этапе развития повышение эффективности вибродиагностики достигается за счет автоматизации решения этой задачи и разработки новых подходов анализа. В статье проводится анализ влияния изменения скорости вращения вала роторного оборудования на качество обработки в частотной области. Представлены результаты экспериментов на тестовом оборудовании.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, резонанс, слежение за частотой, частотная область.

Abstract. Evaluation of the technical condition of rotary equipment by vibration signals is traditionally an important task in the field of its production and maintenance. At the current stage of development increasing the effectiveness of vibration-based diagnostics is achieved by automating the solution of this problem and developing new analysis approaches. The influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on the quality of frequency-domain processing is analyzed in the article. The results of experiments on test equipment are presented.

Keywords: vibration-based diagnostics, digital signal processing, resonance, frequency tracking, frequency domain.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 113, No. 3, pp. 13-18

Influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on frequency-domain processing

Y.P. Aslamov, A.P. Aslamov, I.G. Davydov, A.V. Tsurko

Введение

Виброакустическая диагностика оборудования, содержащего вращающиеся узлы, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния оборудования. Успехи в этой области сокращают затраты на эксплуатацию, ремонт и снижают риски аварий на производстве и транспорте. Современное состояние и дальнейшее развитие технической диагностики основано на автоматизации анализа и принятия решений, а также интеграции в бизнес-процессы, для чего используется вычислительная техника, сети передачи данных, цифровая обработка сигналов и технологии машинного обучения.

Объектом анализа традиционных методов вибродиагностики, наибольшее распространение из которых получили методы частотного анализа, является оборудование, характеристики которого не изменяются в течение установленного интервала времени. В противном случае эффективность традиционных методов может оказаться недостаточной для принятия корректных решений.

В данной работе обсуждаются методы, позволяющие проводить точную диагностику роторного оборудования с изменяющейся скоростью вращения: методы слежения за частотой и передискретизация сигнала. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена увеличением интереса промышленности к ветряным генераторам и, как следствие, к системам их диагностики.

Теоретический анализ

В качестве объекта анализа вибродиагностика использует вибрационный сигнал, который является носителем информации о техническом состоянии оборудования. В соответствии с интегралом Дюамеля, анализируемый вибрационный сигнал $v(t)$ можно представить в виде свертки вибрационного сигнала возмущения $v_0(\tau)$ и импульсной характеристики оборудования $h(t)$:

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v_0(\tau)h(t - \tau)d\tau . \quad (1)$$

В общем виде диагностируемое оборудование можно рассматривать как цифровой фильтр с передаточной характеристикой $H(z)$:

$$H(z) = H_{eq}(z) \cdot H_s(z) , \quad (2)$$

где $H_{eq}(z)$ – передаточная характеристика оборудования, $H_s(z)$ – передаточная характеристика измерительного тракта. Границы полосы пропускания вибродатчика определяются по скату АЧХ на 3 дБ. Тогда в полосе частот измерений передаточную характеристику примем $H_s(z) = 1$, следовательно, $H(z) = H_{eq}(z)$ и может быть записана в виде

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_Nz^{-N}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_Mz^{-M}} , \quad (3)$$

где порядок фильтра больше N или M [1].

Нули числителя (3) соответствуют нулям частотной характеристики, на этих частотах коэффициент передачи фильтра равен нулю, нули знаменателя – полюсам, на этих частотах происходит резонансное усиление входного сигнала.

Следует отметить, что характеристика оборудования (фильтра) $H(z)$ в пределах анализируемого вибросигнала есть величина постоянная. Изменение параметров $H(z)$ происходит только вследствие изменения конструкции оборудования, т. е. ремонта, деградации или замены элементов.

Таким образом, изменение характеристик вибрационного сигнала в предложенной модели в большей степени связано с сигналом вибрации возмущения $v_0(t)$, который представляет собой функцию многих параметров:

$$v_0(t) = f(N(t), S(t), T(t), \dots) , \quad (4)$$

где $N(t)$ – закон изменения нагрузки, $S(t)$ – закон изменения скорости вращения, $T(t)$ – закон изменения температуры и т. д. В данной статье рассматривается зависимость анализируемого вибросигнала только от скорости вращения вала оборудования, когда $v_0(t) = f(S(t))$.

Резонансные частоты оборудования, определяемые полюсами (3), могут быть рассчитаны численно. Например, подшипник упрощенно представляет собой набор двух тонкостенных колец (внутреннего и внешнего) и тел качения. Тогда резонансная частота внутреннего кольца определяется приближенной формулой:

$$f_r = \frac{R(R^2 - 1)}{2\pi\sqrt{R^2 + 1}} \cdot \frac{1}{a^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} , \quad (5)$$

где R – порядок резонанса, a – радиус нейтральной оси, J – момент инерции поперечного сечения, m – удельная линейная масса кольца, E – модуль упругости [2].

В выражении (5) f_r определяется только геометрическими параметрами подшипника и свойствами материала, из которого он изготовлен. Следовательно, резонансная частота f_r инвариантна к значению скорости вращения вала.

Методика эксперимента

Источником вибрационных сигналов является тестовый стенд, содержащий электродвигатель АИР80В6 с частотным управлением. Объектом анализа является роликовый подшипник 6213. Сигналы вибрации получены в формате WAV-файлов, снятых при помощи

одноканальных датчиков VBX. Для проведения эксперимента использована вычислительная среда MATLAB. Проанализировано 52 реализации подшипника в нормальном состоянии и 64 – для подшипника с дефектом наружного кольца. В силу ограничений статьи ниже представлена небольшая часть этой выборки.

Частота вращения вала изменялась в пределах 20 % по заранее установленному закону. Значение скорости вращения ротора тестового стенда контролировалось посредством индикатора системы частотного управления электродвигателя.

Основными задачами эксперимента являлись:

а) анализ передаточной характеристики оборудования при различных скоростях вращения вала;

б) анализ эффективности применения алгоритмов передискретизации и слежения за частотой для анализа в частотной области (анализ спектра и спектра огибающей виброускорения).

Результаты и их обсуждение

Изменение частоты вращения вала осуществлялось по заранее известному закону в диапазонах $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$, $\pm 2,5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 0,5\%$. Номинальная скорость вращения вала $S_0 = 750$ об/мин. Целью данной статьи не является анализ методов слежения за частотой. Все законы изменения частоты, полученные алгоритмически, проверены экспериментально. На рис. 1, а представлен закон изменения частоты в диапазоне $\pm 20\%$, на рис. 1, б – спектрограмма виброускорения сигнала подшипника 6213 с дефектом тел качения.

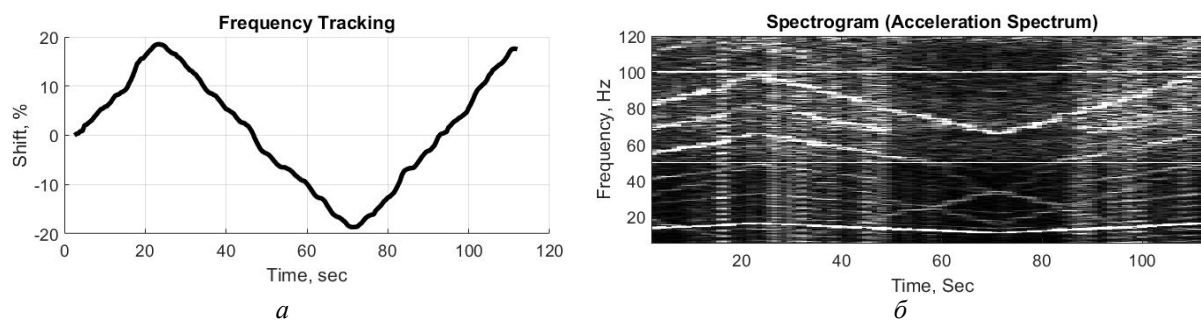


Рис. 1. Изменение частоты вращения вала:
а – закон изменения частоты; б – спектрограмма виброускорения

Спектрограмма виброускорения (рис. 1, б) содержит 2 типа компонент: «переменные» – гармоники частоты вращения вала $F_1 = 13,5$ Гц; гармоники частоты сепаратора $FTF = 5,5$ Гц и «постоянные» – гармоники сетевой частоты $FL = 50$ Гц. Значения «переменных» компонент, в отличие от «постоянных», напрямую зависят от закона изменения частоты (рис. 1, а).

Передаточная характеристика оборудования $H(z)$ получена при помощи алгоритма линейного предсказания фрагментов сигнала длительностью $T = 0,5$ с. Порядок синтезируемого фильтра $N = 32$. Фрагменты выбраны в моменты времени $t_1 = 26$ с, $t_2 = 46$ с. и $t_3 = 71$ с, соответствующие скоростям вращения вала $S_1 = 900$ об/мин, $S_2 = 750$ об/мин и $S_3 = 600$ об/мин (рис. 1, а).

Сигнал виброускорения передискретизирован в соответствии с полученным законом изменения частот (рис. 1, а). На рис. 2 представлена передаточная характеристика фильтра (оборудования) до и после передискретизации.

Как представлено на рис. 2, а, значения резонансных частот оборудования при различных скоростях вращения вала остаются неизменными в пределах некоторой погрешности. С другой стороны, процесс передискретизации применяется как к вибрационному сигналу возмущения $v_0(\tau)$ с изменяющимися параметрами, так и к передаточной характеристике фильтра $H(z)$ с постоянными параметрами. Вследствие этого выраженность «переменных» спектральных составляющих увеличивается, а «постоянных» – уменьшается.

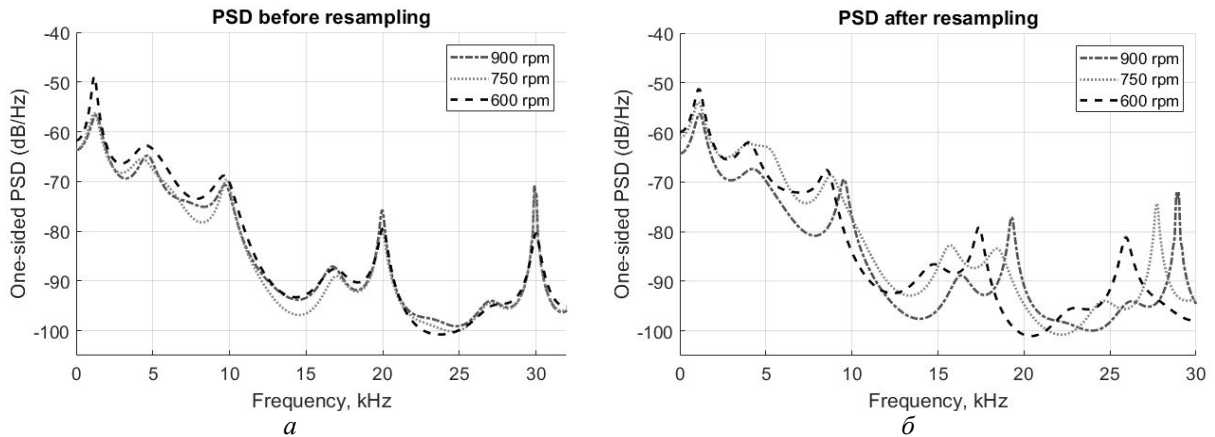


Рис. 2. Передаточная характеристика фильтра:
 а – до передискретизации; б – после передискретизации

Под выраженностью будем понимать

$$P(f, q) = \frac{\max(f, q)}{\text{rms}(f, q)}, \quad (6)$$

где $\max(f, q)$ – амплитуда спектральной составляющей f , $\text{rms}(f, q)$ – среднее квадратическое значение амплитудного спектра в окрестности q , причем $q = 5 \dots 20 \%$.

Как показано на рис. 3, а, выраженность «переменной» составляющей $F1$ после передискретизации увеличилась в $P(F1, 5) / P_{\text{res}}(F1, 5) = 2,43$ раза. Выраженность «постоянной» составляющей FL после передискретизации уменьшилась в $P(FL, 5) / P_{\text{res}}(FL, 5) = 8,72$ раза (рис. 3, б). Выраженность ВЧ резонансных частот после передискретизации (рис. 3, а) уменьшилась на несколько порядков, в отличие от НЧ-области, где смещение резонансной частоты после передискретизации меньше ширины резонансной области (рис. 2, б).

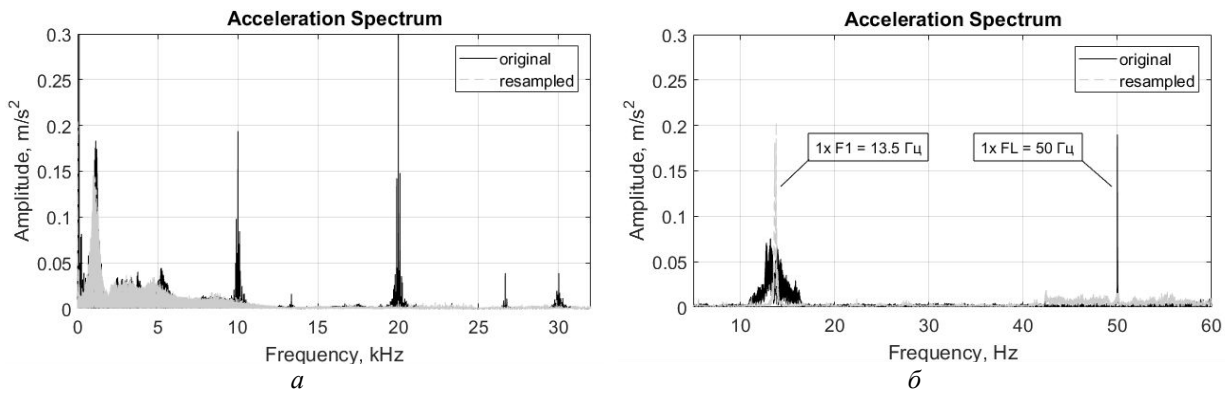


Рис. 3. Спектр сигналов виброускорения до и после передискретизации:
 а – диапазон $D = 0 \dots 32$ кГц; б – диапазон $D = 5 \dots 60$ Гц

Дефекты подшипников и зубчатых передач сопровождаются модуляционными процессами. Традиционно для диагностики данных элементов используется спектр огибающей виброускорения. Вследствие того, что области резонансов изменяют свое положение и форму после передискретизации, интерес представляет сравнение спектров огибающей, полученных для методов «передискретизация-огибающая-спектр» («*res-env*» на рис. 4, а, б) и «огибающая-передискретизация-спектр» («*env-res*» на рис. 4, а, б). Метод расчета «передискретизация-огибающая-спектр» подразумевает следующей шага:

- 1) оценка закона изменения частоты;
- 2) передискретизация сигнала виброускорения;
- 3) полосовая фильтрация и расчет огибающей виброускорения;
- 4) расчет спектра огибающей.

Для метода «передискретизация-огибающая-спектр» шаги 2 и 3 меняются местами.

Для резонансных частот, находящихся в НЧ-области ($f_0 = 1$ кГц, рис. 3, а), форма спектра огибающей идентична для обоих методов расчета (рис. 4, а). Для резонансных частот, находящихся в ВЧ-области ($f_0 = 10$ кГц, 20 кГц, рис. 3, а), выраженность спектральных составляющих $k\text{-FTF}$ для спектра огибающей метода «огибающая-передискретизация-спектр» в среднем выше на 18,5–27,3 %, чем в спектре по методу «передискретизация-огибающая-спектр» (рис. 4, б).

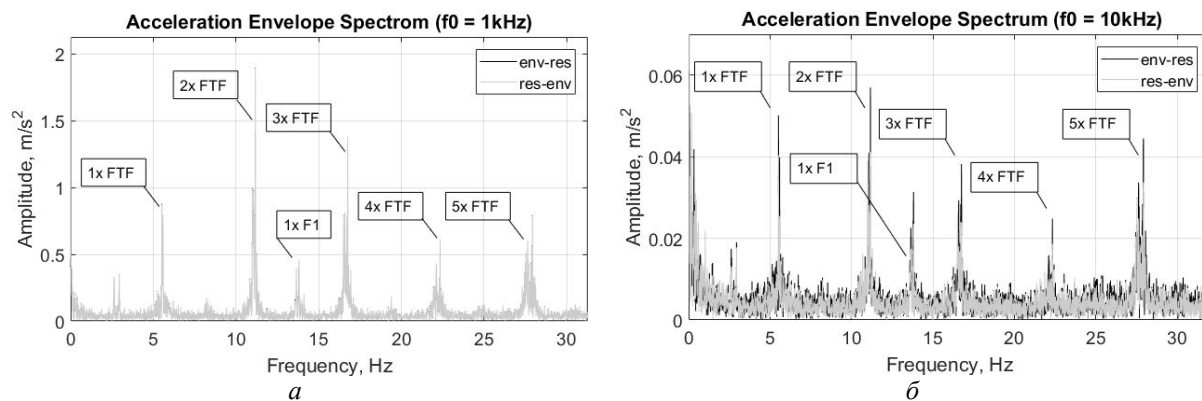


Рис. 4. Сравнение методов расчета огибающей виброускорения:
а – резонансная частота $f_0 = 1$ кГц; б – резонансная частота $f_0 = 10$ кГц

Резонансные частоты ВЧ-области $f_0 = 10$ кГц и $f_0 = 20$ кГц промодулированы также «постоянными» составляющими kFL , выраженность которых после передискретизации в случае 20-процентного изменения частоты уменьшилась на порядок (рис. 5, а).

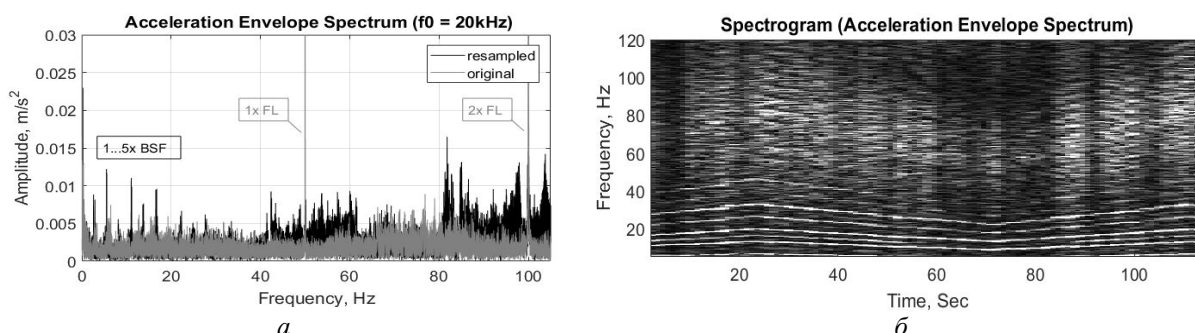


Рис. 5. Спектр огибающей виброускорения: а – спектр до и после передискретизации;
б – спектрограмма огибающей до передискретизации

Таким образом, для диагностики оборудования с изменяющейся скоростью вращения вала предлагается использовать спектры до и после передискретизации. Данный подход позволяет выделить как «постоянные», так и «переменные» информативные признаки в частотной области с минимальными амплитудными искажениями. Структурная схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 6.

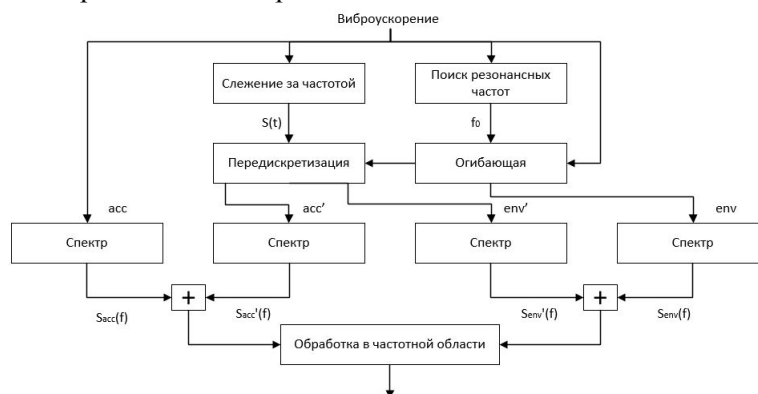


Рис. 6. Блок-схема обработки в частотной области для оборудования с переменной скоростью вращения вала

Следует отметить, что в предложенном подходе большое влияние на качество обработки будут оказывать алгоритмы уточнения частоты [3].

Заключение

В статье приведен анализ степени влияния изменения частоты вращения вала на качество обработки в частотной области. Как было показано, методы слежения за частотой и передискретизация сигнала значительно улучшают обработку в спектральной области. Спектр огибающей предложено рассчитывать по методу «огибающая-передискретизация-спектр». Также для увеличения достоверности диагностики предложено использовать информативные признаки спектров до и после передискретизации. Дальнейшая работа будет направлена на исследование инвариантных свойств временной области [4].

Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа. 446 с.
2. Абрамов И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования. Кемерово, 2011. 80 с.
3. Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 1511–1521.
4. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 1726–1736.

References

1. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly . M.: Vysch. shkola. 446 s. (in Russ.)
2. Abramov I.L. Vibrodiagnostika ehnergeticheskogo oborudovaniya. Kemerovo, 2011. 80 s. (in Russ.)
3. Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 1511–1521.
4. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 1726–1736.

Сведения об авторах

Асламов Ю.П., аспирант кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Асламов А.П., аспирант кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов И.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цурко А.В., научный сотрудник НИЛ 1.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Aslamov Y.P., PG student of software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Aslamov A.P., PG student of software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Davydov I.G., PhD, associate professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsurko A.V., researcher of SRL 1.5 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-79;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com
Асламов Юрий Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-86-79;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com
Aslamov Yury Pavlovich