

Трибологические испытания и диагностика

УДК 621.891:53.082.4

В.И. Новиков, канд. физ.-мат. наук (ООО «Венчур-Н», Москва)

E-mail: venchur-n@mail.ru, info@venchur-n.ru

Оригинальная методика вибродиагностики узлов трения как составная часть технологии безыносной эксплуатации

Novikov V.I.

Original technique of the friction knots vibrodiagnostics as a component of the wearless operation technology

Сочетание безыносной эксплуатации всех видов механического оборудования с обслуживанием по фактическому состоянию, на основании вибродиагностических показаний, обеспечивает максимальную надежность при минимальной стоимости эксплуатации. В этих целях, разработана и массово опробована оригинальная методика вибродиагностики, доступная пониманию персонала среднего уровня.

The combination of wearless operation of all kinds of the mechanical equipment with service on an actual state, on the basis of vibrodiagnostic indications, provides the maximum reliability at the minimum cost of operation. In these purposes, the original technique of vibrodiagnostics, cogitable the average level personnel, is developed and is in large quantities tested.

Ключевые слова: *Вибродиагностика узлов трения, обслуживание по фактическому состоянию.*

Key words: *Vibrodiagnostics of friction knots, service on an actual state.*

1. Введение

Контроль, диагностика и прогноз вибросостояния машин и оборудования в процессе их работы, в международной практике, объединяются под одним термином - мониторинг состояния оборудования. По целевому назначению системы мониторинга делятся на два класса - системы предупредительного и защитного мониторинга. Вторые, как правило, не несут диагностических функций, а, как это принято в системах аварийной защиты, отключают оборудование, когда контролируемые параметры выходят за рамки установленных допусков.

Задачей систем предупредительного мониторинга является обнаружение изменений состояния оборудования задолго до наступления аварийной ситуации и своевременная выдача предупреждения обслуживающему персоналу. Если такая система способна

обнаружить все опасные изменения, по крайней мере, за несколько дней до аварии, она может быть выполнена в переносном (портативном) виде. Если она рассчитана на обнаружение нескольких видов дефектов, но при условии, что хотя бы один из них появляется за несколько часов до аварии в результате развития любой последовательной цепочки дефектов, то подобная система мониторинга выполняется преимущественно в виде стационарной системы.

Стационарные системы, в настоящее время, вследствие высокой стоимости и сложности обслуживания, не могут быть предметом массового применения.

Эксплуатация оборудования с обслуживанием по фактическому состоянию, на основании диагностических показаний, применяется только в особо ответственных случаях: на газоперекачивающих станциях, на электростанциях при эксплуатации турбин и электрогенераторов, на морских платформах, в самолетах. Мы же предлагаем такой режим обслуживания для всех видов оборудования и техники, что значительно повышает надежность эксплуатации, даже предельно изношенного оборудования. При этом, вследствие отказа от ежегодных регламентных разборок-сборок, значительно снижается стоимость эксплуатации.

Переход от планово-профилактического обслуживания оборудования к обслуживанию на основании вибродиагностических показаний стал возможен в связи с разработкой и массовой апробацией технологии безыносной эксплуатации (ТБЭ), основанной на применении антифрикционной ресурсовосстанавливающей композиции (АРВК).

Применение АРВК исключает опасность неожиданного катастрофического отказа. Поэтому достаточно периодически контролировать работу оборудования с помощью недорогого компактного виброметра, а затем вносить результаты контроля в пополняемую компьютерную базу данных.

Оригинальная методика вибродиагностики была разработана в процессе наблюдения за работой сотен единиц оборудования электро и теплостанций. Основное ее преимущество заключается в том, что интерпретация результатов измерений становится доступной пониманию рядовых механиков и сменных мастеров. Регулярный контроль вибропараметров и анализ динамики изменения вибросостояния с помощью постоянно пополняемой компьютерной базы данных позволяют организовать эффективный централизованный вибромониторинг любого количества механического оборудования.

2. Методические основы проведения виброизмерений

Измерения проводятся виброметрами, измеряющими среднеквадратичные значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Особенностью таких виброметров является то, что виброускорение измеряется в диапазоне частот 10 -5000 Гц; виброскорость – в диапазоне 10 – 1000 Гц; виброперемещение – в диапазоне 10 – 200 Гц.

Поэтому измерение виброускорения позволяет проследить, например, зарождение микродефектов дорожек качения и шариков или роликов подшипников качения и их дальнейшее развитие, что находит отражение именно в высокочастотной области спектра.

Измерение виброскорости позволяет обнаружить биения, что является следствием увеличения радиальных зазоров. Частота биений может значительно превышать основную частоту вращения, что соответствует среднему частотному диапазону измерения виброскорости.

Уменьшение жёсткости подшипников качения проявляется в увеличении амплитуды колебаний вблизи основной частоты, т.е. частоты вращения, что фиксируется измерениями виброперемещения.

На корпусе механизма вблизи расположения опор, например, в четырех контрольных точках, отмеченных на прилагаемой схеме (рис. 1), по трем направлениям, фиксируются значения виброперемещения, виброскорости и виброускорения. Измеренные значения соответствующих вибропараметров заносятся в строку таблицы, соответствующую номеру контролируемой единицы оборудования, а затем вводятся в базу данных на компьютере.

Вибрационные параметры:

v_r - виброперемещение - линейное смещение подвижной части механизма при колебательном процессе (вибрации), измеряется в мкм, предел 100 мкм;

v_s - виброскорость - является мощностной характеристикой вибрации, измеряется в мм/с, предел 7,1 мм/с;

v_u - виброускорение - является силовой или ударной характеристикой вибрации, измеряется в m/c^2 , предел 10 m/c^2 .

3. Алгоритм качественной характеристики вибросостояния

Качественная характеристика вибросостояния основана на модельном представлении о том, что износ подшипников качения начинает проявляться ростом

виброускорения (дефекты поверхности шариков или роликов и дорожек качения вызывают колебания с частотой, значительно превышающей основную частоту вращения). При дальнейшем износе, когда виброускорение превысит, примерно, величину 5 м/с.кв., проявляется уменьшение жесткости подшипника, что сказывается в увеличении виброперемещения.

Рост виброперемещения на одном из подшипников может вызвать увеличение виброперемещения (вследствие отклонений по соосности, центровке валов, жесткости муфты) на других подшипниках (особенно, осевой составляющей). Признаком такого влияния является рост виброперемещения свыше 50 мкм, в то время как виброускорение не превышает 5 м/с.кв.

Дальнейший износ подшипников сопровождается увеличением радиальных зазоров, что вызывает рост виброскорости. Значение виброскорости, превышающее 4,5 мм/с, при виброускорении, не превышающем 5 м/с.кв., свидетельствует, скорее всего, о недостаточной балансировке рабочего колеса.

В случае, если на подшипниках 3 или 4 виброперемещение превышает 80 мкм, а виброускорение не превышает 10 м/с.кв., необходимо измерить вертикальную составляющую виброперемещения на гайках крепления корпуса подшипников к подушке фундамента. Различие значений более, чем на 20%, свидетельствует об ослаблении крепления там, где вибрация увеличена.

Если крепление корпуса подшипников в норме, то рост виброперемещения связан с недостаточной центровкой или соосностью валов двигателя и роторного механизма.

В связи с тем, что значительная часть новых подшипников качения в России и в странах СНГ имеет отклонения по твердости обойм, необходимо еженедельно контролировать виброускорение подшипников с твердостью, хотя бы одной обоймы, 57-59 единиц по Роквеллу в первые два месяца после начала их эксплуатации.

У таких подшипников, в течение месяца, виброускорение может превысить значение 20 м/с.кв. Анализ многочисленных случаев выхода из строя подшипников качения, до истечения двух месяцев эксплуатации, на различных предприятиях, показал, что ускоренный износ подшипников происходит по следующей схеме:

недостаточная твердость обойм – быстрое истирание или продавливание дорожек качения – снижение жесткости подшипников – усиление вибрации – появление трещины в сепараторе – заклинивание подшипника.

Такие подшипники, изначально, необходимо эксплуатировать со смазочными материалами (жидкими или пластичными), содержащими АРВК. Если за 2 месяца, несмотря на наличие АРВК в смазочных материалах, значение виброускорения в одном из направлений превысит величину 20 м/с.кв., необходимо повторно добавить АРВК в масло

или добавить свежей смазки Политерм-многоцелевая, содержащей АРВК, в подшипники, работающие на пластичной смазке. Если в последующие два месяца рост виброускорения не замедлится и превысит значение 50 м/с.кв., подшипник необходимо заменить.

4. Примеры диагностической интерпретации результатов контроля вибросостояния

В соответствии с изложенными выше соображениями, при «правильном» развитии процесса износа подшипника, сначала нарастают значения виброускорения, что отражает появление и разрастание микродефектов соприкасающихся поверхностей качения. Затем, в результате длительного истирания поверхностей качения, ослабляется жесткость подшипников, что проявляется в росте значений виброперемещения; растут радиальные зазоры, что приводит к росту значений виброскорости.

Одновременное представление всех измеренных вибропараметров, накопленных в базе данных компьютера, позволяет проследить динамику изменения параметров. На рис. 2, где приведены результаты виброконтроля дутьевого вентилятора 6А на ТЭЦ-25 г. Москвы, мы видим, что виброускорение подшипников 3 и 4 превысило допустимые значения, т.е. износ перешел в стадию быстрого разрушения подшипника. Это видно по тому, что всего за месяц (с 16.04 по 15.05.02), резко выросли значения виброперемещения подшипника 3 в осевом направлении и подшипника 4 в осевом и вертикальном направлениях. Начался рост виброскорости подшипника 3, значение которой в 3 раза превысило допустимый предел. После внесения АРВК в масло, начался возврат вибропараметров к нормальным значениям (02.08.02).

Аналогичный пример естественного развития износа подшипника 2 бустерного насоса БЭН-9А ТЭЦ-21 представлен на рис. 3. Виброускорение в горизонтальном и вертикальном направлениях в 4 раза превысило допустимый предел. В результате нарастающего износа, виброперемещение достигло допустимого предела, а виброскорость подшипника 2, в горизонтальном направлении, в 3 раза превысила допустимый предел.

Динамику катастрофического износа при эксплуатации редуктора мельницы помола сырья № 3 Пикалевского цементного завода позволяет оценить пример результатов виброконтроля, приведенных в таблице № 1. Во время капитального ремонта в редукторе была установлена новая пара зубчатых колес. Аномально быстрый рост виброускорения свидетельствует о том, что зубья колес не прошли необходимую термообработку, твердость зубьев ниже нормы, поэтому происходит даже не истирание, а продавливание зубьев. С помощью АРВК катастрофический износ был остановлен.

1. Измерение вибропараметров редуктора мельницы помола сырья № 3 Пикалевский ЦЗ до внесения АРВК

Направления измерения	Дата измерения	Вибропараметры		
		перемещение, мкм	скорость, мм/с	ускорение, м/с ²
горизонтальное	21.06.07	14	2,7	8,4
	01.10.07	48	5,9	26,8
вертикальное	21.06.07	32	4,8	9,2
	01.10.07	124	14,5	65,3
осевое	21.06.07	41	4,6	10,4
	01.10.07	82	11,2	36,3

5. Диагностические показания для ремонта и обслуживания механических узлов в режиме централизованного вибромониторинга

Накопление информации по каждой единице оборудования в базе данных дает возможность в любой момент, по таблице или графически, оценить динамику изменения вибросостояния. Более того, можно организовать объективный централизованный контроль за состоянием, качеством монтажа и обслуживания любого количества оборудования.

Внесение АРВК в смазочные материалы позволяет корректировать вибросостояние только в той части, которая обусловлена износом механических узлов. Искажения вибропараметров, вызванные недостатками монтажа, такими, например, как несоосность и недостаточная центровка валов, не могут быть скорректированы.

В качестве примера, рассмотрим ситуацию на рис. 4. Мы видим, что виброперемещение подшипника 1 дымососа рециркуляции газов ДРГ 1 на ГЭС 1, в вертикальном направлении, и подшипника 2, в поперечном направлении, после внесения АРВК, не только не уменьшились, но и превысили допустимые пределы. В то же время, значения виброускорения и виброскорости этих подшипников свидетельствуют о том, что износ их минимален. Таким образом, мы имеем убедительные показания для того, чтобы проверить качество монтажа электродвигателя ДРГ 1, а именно: соосность и центровку валов двигателя и исполнительного механизма.

Централизованный вибромониторинг может стать действенным средством повышения надежности эксплуатации оборудования в условиях повсеместного предельного износа и дефицита, по количеству и квалификации, кадров. Повышается ответственность ремонтного и обслуживающего персонала и уровень административного и технического управления на всех уровнях. Появляется возможность дистанционного привлечения для анализа сложных ситуаций необходимых специалистов.

Рассмотрим конкретный пример такого анализа. На Владимирской ТЭЦ-2 мы провели виброконтроль подшипников скольжения двух питательных насосов (таблица 2). Насос ПЭН-5 был введен в эксплуатацию после капитального ремонта летом этого года. Мы наблюдаем постепенное нарастание значений виброускорения всех четырех подшипников и соответствующий рост значений виброперемещения и виброскорости – естественное развитие износа.

2. Владимирская ТЭЦ-2. Виброконтроль подшипников питательных насосов

Вибропараметры ПЭН-5 ПЭ-380-185 02.11.10						
№ подш.	v _{рх}	v _{ру}	v _{sx}	v _{sy}	v _{ух}	v _{уу}
1	26	13	3,4	1,3	5,2	2,6
2	34	73	4,1	7,7	8,2	7,8
3	65	23	6,4	2,4	7,5	7,6
4	70	34	6,7	3,3	10,1	9,3

Вибропараметры ПЭН-11 ПЭ-580-195 02.11.10						
№ подш.	v _{рх}	v _{ру}	v _{sx}	v _{sy}	v _{ух}	v _{уу}
1	34	56	3,0	6,0	17,1	21,2
2	35	48	4,1	5,8	11	11,1
3	163	160	4,9	6,5	15,5	24
4	78	90	7,8	4,8	12,8	18,2

Первый пуск насоса ПЭН-11 после капитального ремонта состоялся в день проведения измерений 02.11.10. Вибросостояние подшипников 3 и 4 никак не может соответствовать вибросостоянию подшипников после капитального ремонта. Это результат нарастания износа в течение всего срока предыдущей эксплуатации.

Значения виброускорения подшипников 1 и 2 по скорости роста значительно опережают значения виброперемещения и виброскорости. Мы попытаемся предложить свою версию аномального нарастания виброускорения. Наша интерпретация результатов измерений основана на том, что рост виброускорения отражает увеличение количества микродефектов поверхностей трения, в данном случае количества царапин на поверхности баббитовых вкладышей.

Задиры вкладышей можно объяснить применением при наплавке изношенных вкладышей баббита с крупными кристаллитами твердой фракции. Кроме того, в процессе наплавки трудно контролировать однородность поликристаллической структуры по всему объему, вследствие чего неизбежно возникновение центров механических напряжений, в области которых возрастает вероятность выкрашивания твердых кристаллов.

При раскрутке двигателя насоса без системы мягкого пуска, сразу до максимальных оборотов, инерция роторного механизма является причиной скручивающей деформации вала двигателя. В результате, вал прижимается, на мгновение, к наружным краям вкладышей, продавливая масляный слой и вызывая выкрашивание, прежде всего, крупных твердых кристаллов, царапающих поверхность вкладыша.

Величина крутящего момента, вызывающего деформацию скручивания вала двигателя, зависит от времени запаздывания раскрутки роторного механизма, которое определяется степенью износа и упругостью гуммирующего слоя пальцев муфты.

Таким образом, мы перечислили факторы, влияние которых позволяет объяснить различие в поведении подшипников насосов ПЭН-5 и ПЭН-11. Кроме того, появляется возможность оценить уровень технологической дисциплины и добросовестность исполнителей, а также уровень компетенции руководителей.

6. Заключение

Современная концепция обеспечения надежности эксплуатации механического оборудования, по сути, сводится к стремлению проследить всеми доступными способами за нарастанием износа узлов трения и постараться заменить эти узлы до их полного разрушения. Пассивная, оборонительная практика борьбы с износом обречена на поражение.

Нами разработана и проверена концепция активной наступательной борьбы с износом узлов трения оборудования, основанная на переводе оборудования в режим безыносной эксплуатации с обслуживанием по вибродиагностическим показаниям. В результате применения ТБЭ и смазочных материалов с АРВК на семи цементных заводах зафиксирована экономическая эффективность в размере 135 руб. на 1 потраченный рубль.

Контактные координаты автора:

Новиков Вадим Иванович - e-mail: venchur-n@mail.ru , info@venchur-n.ru

[тел: \(495\)997-7822](tel:(495)997-7822)

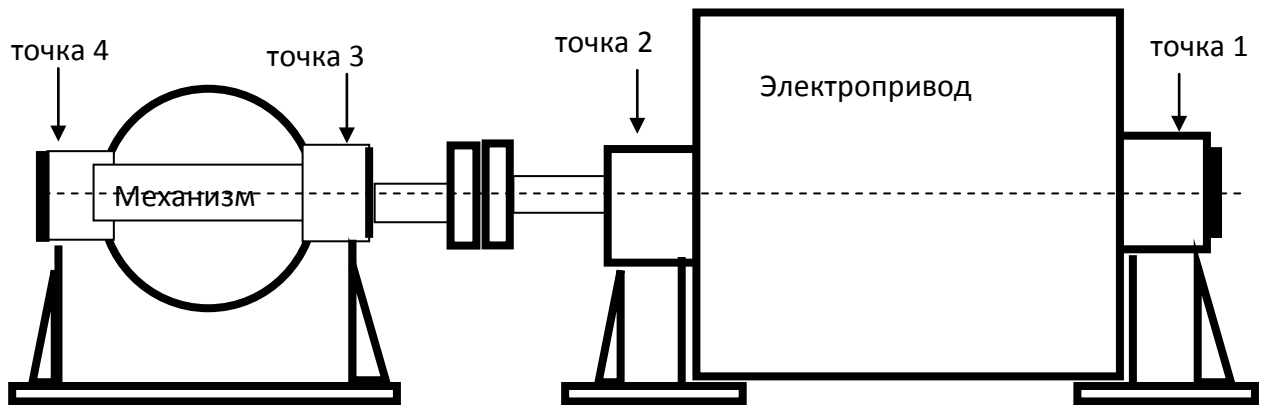
Подрисуночные подписи

Рис. 1. Контрольные точки (а) и направления измерения вибропараметров (б) четырех подшипниковых узлов энергооборудования. По оси X приведены измеряемые вибропараметры: например, v_{r1o} означает виброперемещение первого подшипникового узла в осевом направлении; vs_{3x} – виброскорость третьего подшипникового узла в горизонтальном направлении; vi_{4y} – виброускорение четвертого подшипникового узла в вертикальном направлении. По оси Y приведены значения измеряемых вибропараметров в соответствующих единицах

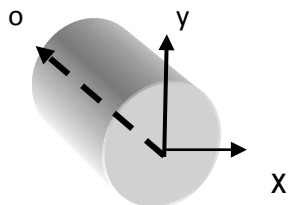
Рис. 2. Результаты виброконтроля дутьевого вентилятора 6А на ТЭЦ-25 г. Москвы. В таблице указаны даты измерения вибропараметров

Рис. 3. Результаты виброконтроля бустерного насоса БЭН-9А на ТЭЦ-21 г. Москвы

Рис. 4. Результаты виброконтроля дымососа рециркуляции газов ДРГ 1 на ГЭС-1 г. Москвы



Контрольные точки измерения в подшипниковых узлах энергооборудования



Направления измерения
вибрационных параметров в
контрольной точке измерения

Вибрационные параметры:

v_r - виброперемещение - линейное смещение подвижной части механизма при колебательном процессе (вибрации), измеряется в мкм, предел 100 мкм;

v_s - виброскорость - является мощностной характеристикой вибрации, измеряется в мм/с, предел 7,1 мм/с;

v_i - виброускорение - является силовой или ударной характеристикой вибрации, измеряется в m/c^2 , предел 10 м/с.кв.

Рис. 1

ДВ-6А, ТЭЦ25

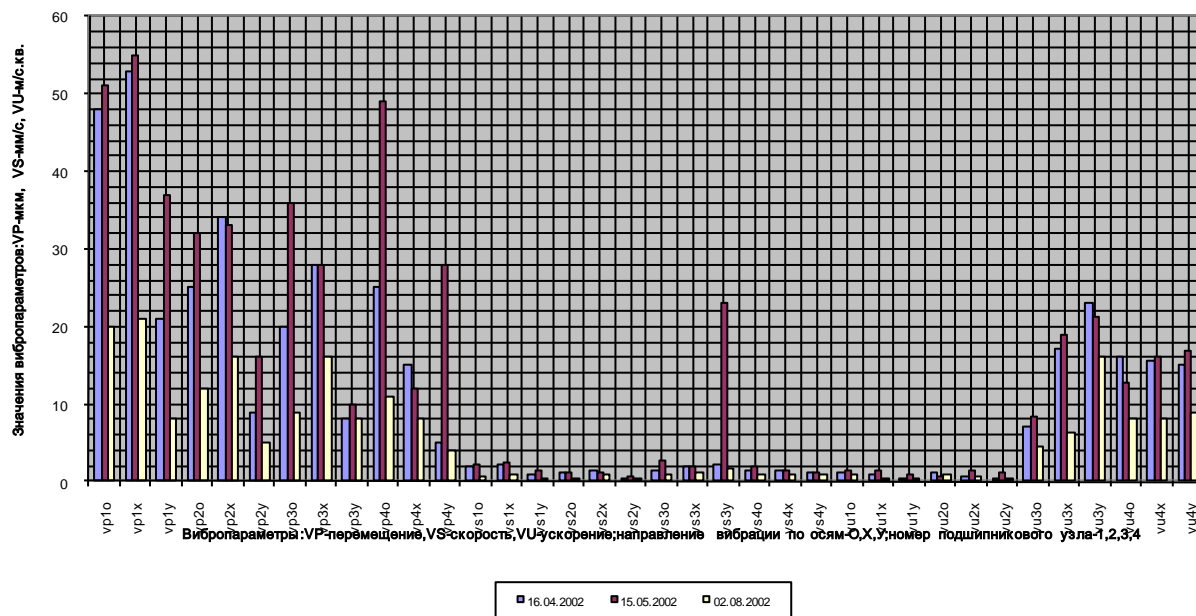


Рис. 2

Бустерный насос БЭН9А, ТЭЦ-21

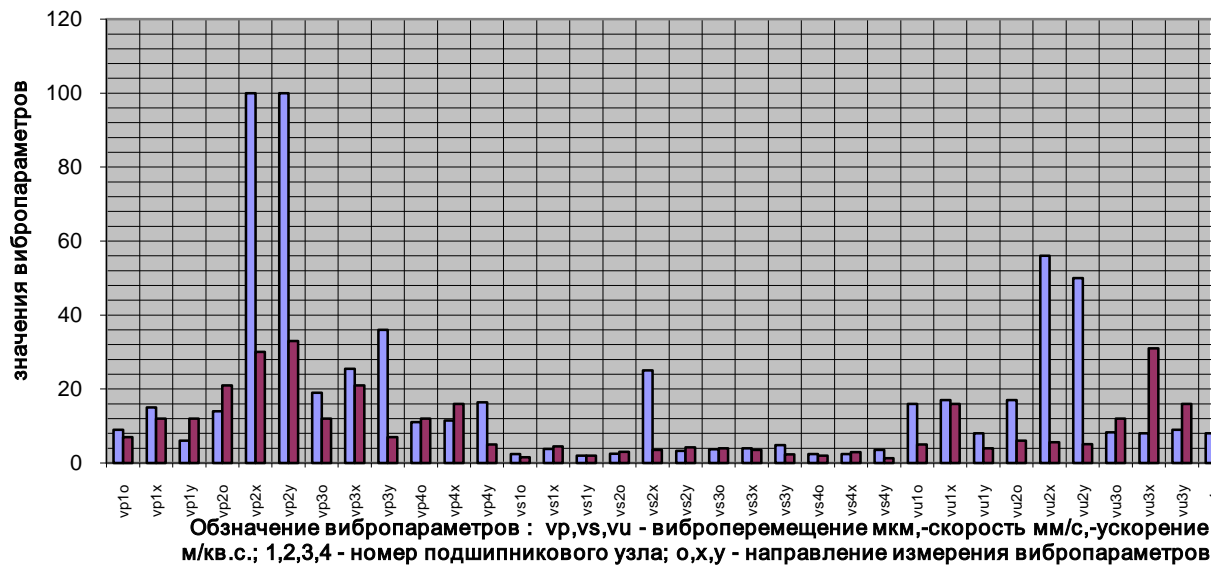
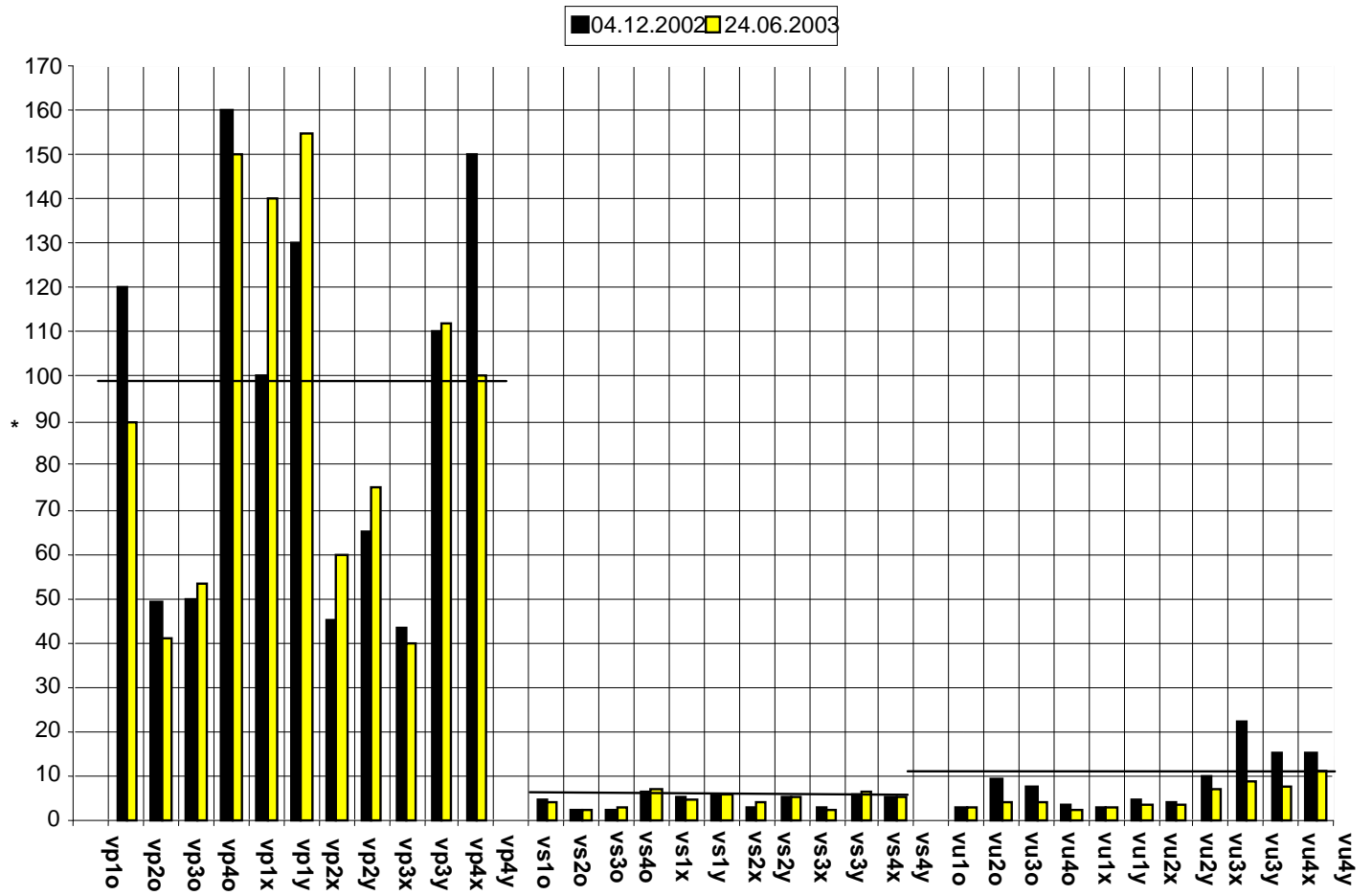


Рис. 3

ДРГ1



*
Рис. 4.