

# Выявление пиковой производительности при высокоскоростной обработке

**SIEMENS**

## Технический обзор

**Практический подход к определению параметров подачи и скорости для достижения максимальной стабильной производительности при высокоскоростной обработке**

Технический обзор содержит практические рекомендации, основанные на теории вибраций, по определению максимальных скоростей съема материала, обеспечивающих безопасные и стабильные условия обработки. Для использования преимуществ от инвестиций в высокоскоростные станки программисты станков с ЧПУ должны точно определить максимальные пределы производительности их систем. В этом документе также представлена процедура определения оптимальных параметров резания при высокоскоростной обработке для любого сочетания инструмента, держателя, станка и материала заготовки. В некоторых случаях применение такого подхода позволяет достичь шестикратного повышения производительности механообработки.

## Содержание

Краткий обзор .....	3
Предлагаемый процесс .....	5
Получение необходимых данных из каталога инструментов.....	6
Сужение диапазона испытаний .....	7
Поддержание постоянной подачи на зуб.....	7
Станочная обработка .....	7
Результаты .....	8
Заключение.....	9
Снижение скорости не всегда является самым эффективным способом предотвращения вибрации.....	9
Обработка при повышенных скоростях вращения шпинделя может быть не самой эффективной .....	10
Примечания к использованию .....	10

## Краткий обзор

Одной из сложнейших задач, с которыми ежедневно сталкивается программист станков с ЧПУ, является определение таких важнейших параметров механообработки, как глубина реза, шаг, скорость вращения шпинделя и подачи материала. Традиционно при этом используются исходные данные из справочника по механообработке или опыт старших специалистов. В большинстве случаев такие сведения являются устаревшими. При возникновении проблем обычно снижают обороты и уменьшают значения одного или нескольких параметров механообработки. Это неизбежно приводит к снижению скорости съема металла. Если в прошлом такой подход был допустим, то в современных условиях жесткой конкуренции на рынке штампов и пресс-форм необходимо работать с высокой производительностью.

Широкое применение высокоскоростных станков в течение последних нескольких лет заставило по-новому посмотреть на процессы обработки. Простое увеличение скорости вращения шпинделя и подачи при одновременном уменьшении сечения срезаемого слоя — это еще не высокоскоростная механообработка. Чтобы воспользоваться преимуществами значительных капиталовложений в высокоскоростные станки и оснастку, программисты станков с ЧПУ должны оптимизировать процесс и установить предельные безопасные параметры работы, которые система может обеспечить.



Рис. 1. Два реза, демонстрирующие стабильные условия механообработки и последствия вибрации.

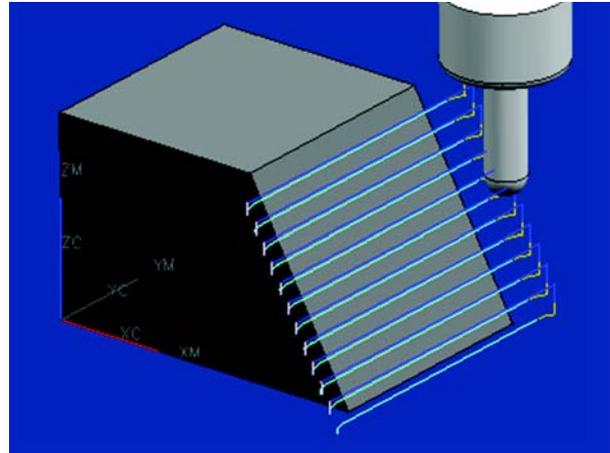


Рис. 2. Скриншот NX™ с представлением резов на Z-уровне на тестовой заготовке.

В данном документе рассматривается взаимосвязь между критическими параметрами механообработки и высокоскоростной обработкой. В обзоре представлен новый метод, посредством которого можно определить параметры резания для оптимального выполнения высокоскоростного фрезерования. Этот практический метод, основанный на теории вибраций и диаграммах зон стабильности, не требует дополнительных затрат при реализации.

Нестабильные условия механообработки приводят к вибрации инструмента и образованию шероховатых, плохо обработанных поверхностей.

В новом методе для определения оптимальных скоростей вращения шпинделя и подачи для любых сочетаний инструмента, держателя, станка и материала заготовки были использованы характеристики нестабильной обработки. При реализации данного метода с целью определения стабильных условий механообработки выполняется серия проходов на Z-уровнях с различными скоростями вращения шпинделя.

Серия идентичных проходов выполняется на наклонной поверхности тестового блока, как показано на рис. 2. Каждый следующий проход выполняется с более высокими скоростями вращения шпинделя, при этом сечение срезаемого слоя остается постоянным для всех проходов. Оптимальные условия механообработки определяются за счет оценки звука при резании и изучения получаемого качества поверхности для каждого из проходов.

Каждая горизонтальная линия на рис. 3 соответствует серии проходов на Z-уровнях с повышением скорости вращения шпинделя. Параллельным линиям, расположенным по вертикали на более высоком уровне, соответствует более высокая скорость съема металла. Вертикальные стрелки указывают на предельные значения при каждой определенной стабильной скорости вращения шпинделя.

Условия испытаний и результаты пробных проходов представлены в виде диаграммы зон стабильности (рис. 3). Используя диаграмму и простые уравнения, можно вычислить скорость съема металла для каждого сочетания скорости вращения шпинделя и глубины реза. Эксплуатация системы на пике скорости съема металла, но в безопасных и стабильных условиях механообработки гарантирует оптимальную производительность.

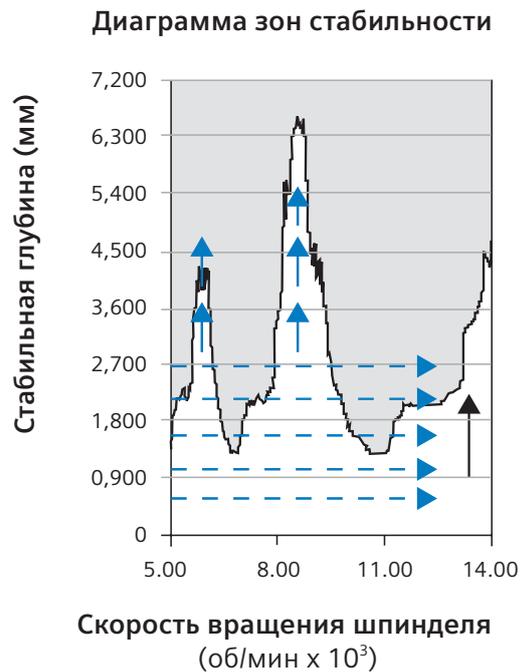


Рис. 3. Условия резания на диаграмме зон стабильности.

## Предлагаемый процесс

Практическая проверка предложенной альтернативной методики проводилась на станке модели Makino V33. В данном случае используется концевая сферическая фреза Jabro Tornado диаметром 10 мм. Длина инструмента в держателе HSK задана равной 30 мм. Используемая заготовка P20 имеет длину 82 мм, ширину — 65 мм, высоту — 48 мм. Одна из сторон заготовки имеет скос под углом 30° к нормали для обеспечения пространства для держателя и четкой видимости проходов.

В данном примере глубина реза равна примерно 30 % величины диаметра инструмента. Если имеются другие ограничения в отношении нагрузки на инструмент, используйте соответствующее меньшее значение. Следите за тем, чтобы инструмент образовывал четкие переходы, позволяющие отличить одну глубину реза от другой. Высота блока должна быть достаточной для размещения на наклонной поверхности не менее 12 проходов. Держатель не должен касаться наклонной поверхности заготовки. Длина блока должна превышать размеры зажимного приспособления и обеспечивать минимум 10 боковых проходов. Ширина обрабатываемой поверхности должна быть достаточной для четкой идентификации отдельных проходов.

## Получение необходимых данных из каталога инструментов

Скорость резания							
Материал	Номер группы Seco	Черновое фрезерование пазов м/мин	Чистовая спиральная обработка м/мин	Черновое фрезерование боковых поверхностей м/мин	Чистовое фрезерование боковых поверхностей м/мин	Черновое фасонное фрезерование м/мин	Чистовое фасонное фрезерование м/мин
Сталь низкоуглеродистая	1-2	90/225*	250	375	450	325	500
Сталь нормальная	3-4	80/180*	210	310	390	280	385
Сталь инструментальная, <48 HRC	5-6	50/160	180	280	350	240	325
Сталь закаленная, >48-56 HRC	7	125	150	250	300	200/170*	280
Сталь закаленная, >56-62 HRC	7	80	90	150	175	120/100*	150
Сталь закаленная, >62-65 HRC	7	50	55	80	90	100/80*	110
Сталь закаленная, >65 HRC	7	35	35	55	60	80/60*	85
Сталь нержавеющая	8-9	95	100	155	200	125	210
Сталь нержавеющая труднообрабатываемая	10-11	60	70	120	145	80	125
Чугун мягкий	12-13	175	185	250	285	250	345
Чугун твердый	14-15	150	160	200	245	200	290
Алюминий с содерж. кремния (Si) < 16 %	16	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.	Макс.
Алюминий с содерж. кремния (Si) > 16 %	17	250	280	295	325	300	345
Сплавы сверхпрочные	20	50	60	80	120	100	150
Сплавы сверхпрочные труднообрабатываемые	21	25	30	40	50	50	75
Сплавы на основе титана	22	75	80	120	145	100	170
Графит		600	600	600	400	800	500
Пластик мягкий * *		300	400	385	450	Макс.	Макс.
Пластик твердый * *		150	175	190	250	200	175
Медь		350	450	450	550	Макс.	Макс.

\* Относится к альтернативным в таблице выбора инструментов.

\* \* В случае размягчения пластмассы следует уменьшить скорость резания (при высокой степени износа вследствие добавленных компонентов снизьте скорость резания).

Подача на зуб, Fz Ш 8–10 мм							
Материал	Номер группы Seco	Черновое фрезерование пазов mm/tooth	Чистовая спиральная обработка mm/tooth	Черновое фрезерование боковых поверхностей mm/tooth	Чистовое фрезерование боковых поверхностей mm/tooth	Черновое фасонное фрезерование mm/tooth	Чистовое фасонное фрезерование mm/tooth
Сталь низкоуглеродистая	1-2	0.090/0.045*	0.057	0.081	0.085	0.130	0.117
Сталь нормальная	3-4	0.80/0.042*	0.053	0.076	0.079	0.121	0.109
Сталь инструментальная, <48 HRC	5-6	0.070/0.041*	0.051	0.072	0.076	0.115	0.105
Сталь закаленная, >48-56 HRC	7	0.039	0.049	0.070	0.074	0.150/0.112*	0.101
Сталь закаленная, >56-62 HRC	7	0.036	0.045	0.065	0.068	0.120/0.104*	0.093
Сталь закаленная, >62-65 HRC	7	0.030	0.038	0.054	0.057	0.100/0.086*	0.078
Сталь закаленная, >65 HRC	7	0.030	0.038	0.054	0.057	0.090/0.086*	0.078
Сталь нержавеющая	8-9	0.045	0.057	0.081	0.085	0.091	0.117
Сталь нержавеющая труднообрабатываемая	10-11	0.042	0.053	0.076	0.079	0.085	0.109
Чугун мягкий	12-13	0.045	0.057	0.081	0.085	0.104	0.117
Чугун твердый	14-15	0.042	0.053	0.076	0.079	0.097	0.109
Алюминий с содерж. кремния (Si) < 16 %	16	0.060	0.076	0.108	0.113	0.173	0.156
Алюминий с содерж. кремния (Si) > 16 %	17	0.050	0.063	0.090	0.095	0.144	0.130
Сплавы сверхпрочные	20	0.040	0.050	0.072	0.076	0.081	0.104
Сплавы сверхпрочные труднообрабатываемые	21	0.036	0.045	0.065	0.068	0.073	0.093
Сплавы на основе титана	22	0.042	0.053	0.076	0.079	0.085	0.109
Графит		0.055	0.069	0.099	0.104	0.159	0.143
Пластик мягкий		0.050	0.063	0.090	0.095	0.144	0.130
Пластик твердый		0.045	0.057	0.081	0.085	0.123	0.117
Медь		0.048	0.061	0.086	0.091	0.138	0.124

\* Относится к альтернативным в таблице выбора инструментов.

Рис. 4. Таблица параметров резания, рекомендованных изготовителем.

Изготовитель предоставляет два важных параметра: максимальную скорость резания и сечение срезаемого слоя. Максимальная скорость резания зависит от типа покрытия инструмента и максимальной температуры, которой он способен противостоять. Сечение срезаемого слоя (подача на зуб) зависит от материала и геометрии кромки инструмента.

В соответствии с прилагаемой таблицей максимальная скорость резания составляет 280 мм/мин, а подача на зуб — 0,072 мм. Этот пример предполагает условия черновой обработки боковой поверхности при испытании.

Чтобы не превышалась максимально допустимая скорость резания, необходимо выдерживать скорость вращения шпинделя на уровне не более 9000 об/мин.

(Примечание. Допускается повышение скорости вращения при чистовом фрезеровании.)

$$\text{Макс. скорость вращения} = \frac{\text{макс. скорость резания в мм/мин}}{\pi \times \text{диаметр инструмента}}$$

$$\text{Макс. скорость вращения} = \frac{280 * 103}{\pi * 10} = 8912 \approx 9000$$

### Сужение диапазона испытаний

В данных испытаниях скорость вращения шпинделя изменяется в пределах от 6000 до 11 500 об/мин с интервалом в 500 об/мин. Максимальная скорость вращения увеличена с целью оценки применимости результатов к условиям чистовой обработки. Глубина реза каждого прохода на Z-уровне равна 4 мм. В программу вручную внесены правки, отражающие изменяющуюся скорость вращения шпинделя на каждом из уровней резания.

### Поддержание постоянной подачи на зуб

Подача инструмента настраивается так, чтобы поддерживалась постоянная скорость подачи на зуб в течение всего испытания.

$$\text{Подача мм/мин} = \text{подача на зуб} \times \text{количество зубьев} \times \text{скорость вращения}$$

### Станочная обработка

Выполняется первоначальный рез на наклонной плоскости с шагом 0,5 мм. Величина шага регулируется с учетом смещения по оси X станка. Это устраняет необходимость использования новой программы для каждого цикла.

Первоначальный рез с величиной шага 0,5 мм выполняется снова, чтобы обеспечить одинаковые начальные условия для каждого цикла. Рез создает стабильные условия резания на всей наклонной поверхности. (Некоторые резы нечеткие у основания в точке перехода. Это обусловлено снижением скорости резания.)

Величина шага увеличивается до 1 мм, и цикл повторяется. Несмотря на то что диаграмма зон стабильности прогнозирует устойчивые условия механообработки при всех скоростях вращения шпинделя, в областях крайних значений скорости вращения шпинделя заметны небольшие признаки вибрации. Процесс повторяется с увеличением значения шага до возникновения сильной вибрации при шаге 2 мм. Этот цикл четко показывает, что стабильные условия механообработки обеспечиваются при скоростях вращения шпинделя 7000 и 9500 об/мин.

Увеличение шага продолжается до достижения значения 3 мм. Условия резания при скоростях вращения шпинделя 7000 и 9500 об/мин остаются стабильными.



## Заключение

Диаграмма зон стабильности помогает определить стабильные условия резания при различных скоростях вращения шпинделя и съема материала. Диаграмму можно использовать для определения значений максимально допустимой скорости съема материала как ключевого показателя эффективности механообработки при заданной скорости вращения шпинделя. Следует отметить, что достижение стабильных условий фрезерования возможно при любой скорости вращения, но за счет снижения скорости съема материала. Общее представление диаграммы, вычисленной с помощью аппаратных средств прогнозирования вибрации или с использованием описанного здесь метода, помогает достичь высокой скорости съема материала при определенной стабильной скорости вращения шпинделя.

### Снижение скорости не всегда является самым эффективным способом предотвращения вибрации

Зачастую при возникновении вибрации операторы снижают скорость вращения шпинделя. Это позволяет создать стабильные условия резания, однако может привести к снижению производительности. Вместо снижения скорости ее можно увеличить, что также устранил вибрацию, одновременно повысив эффективность резания.

На представленной ниже диаграмме имеет место легкая вибрация в точке А (8000 об/мин, шаг — 2,0 мм). Помимо перепрограммирования обработки заготовки с использованием меньшей величины шага есть два других, более простых способа устранения вибрации, связанных с уменьшением или увеличением скорости вращения шпинделя. Поскольку на диаграмме зон стабильности четко видно, что стабильные условия резания достигаются при увеличении скорости вращения шпинделя, этот вариант является предпочтительным как наиболее эффективным.

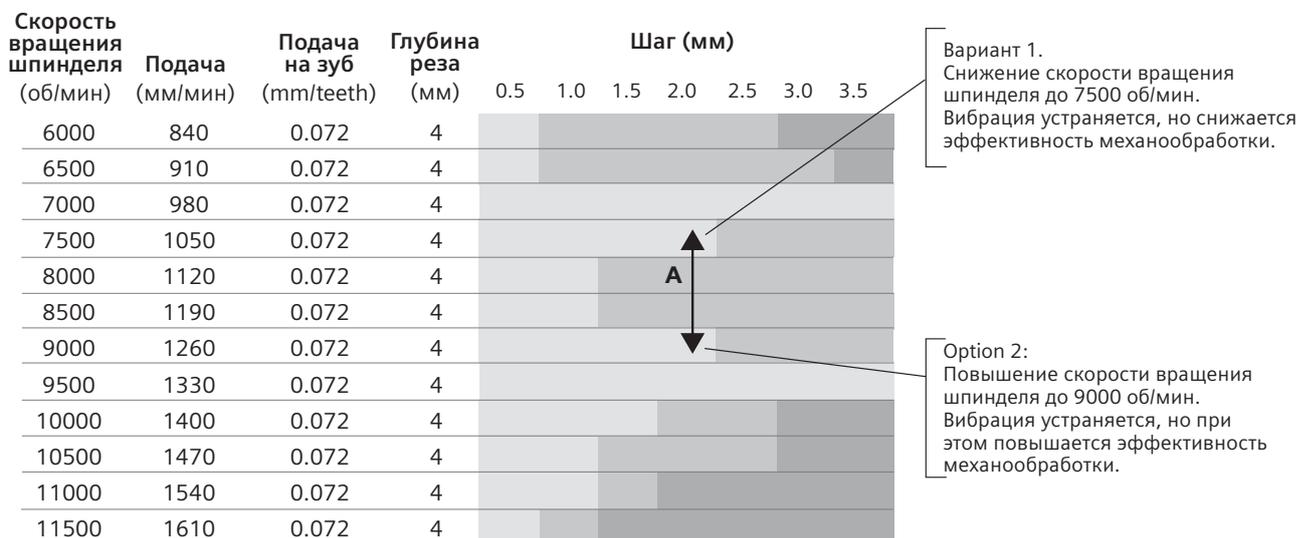


Рис. 7. Увеличение скорости вращения шпинделя приводит к формированию стабильных условий резания и повышает эффективность обработки.

## Обработка при повышенных скоростях вращения шпинделя может быть не самой эффективной

Как правило, при высокоскоростной обработке станки стараются эксплуатировать при максимально допустимой скорости вращения шпинделя. Несмотря на то что при крайних значениях скорости возможно достижение условий резания без вибрации, эффективность механообработки, измеряемая как скорость съема материала, может оказаться низкой.

*Скорость съема материала = подача мм/мин x глубина реза мм x шаг мм*

В представленной ниже диаграмме показано, что стабильные условия резания достигаются при скорости вращения шпинделя 11 500 об/мин и шаге 0,5 мм (точка А). Поскольку шпиндель вращается с большой скоростью, можно предположить, что система работает эффективно. Однако, как показывает диаграмма зон стабильности, такое заключение ошибочно. В точке В гораздо более низкая скорость вращения шпинделя при большей глубине реза приводит почти к шестикратному повышению эффективности механообработки.

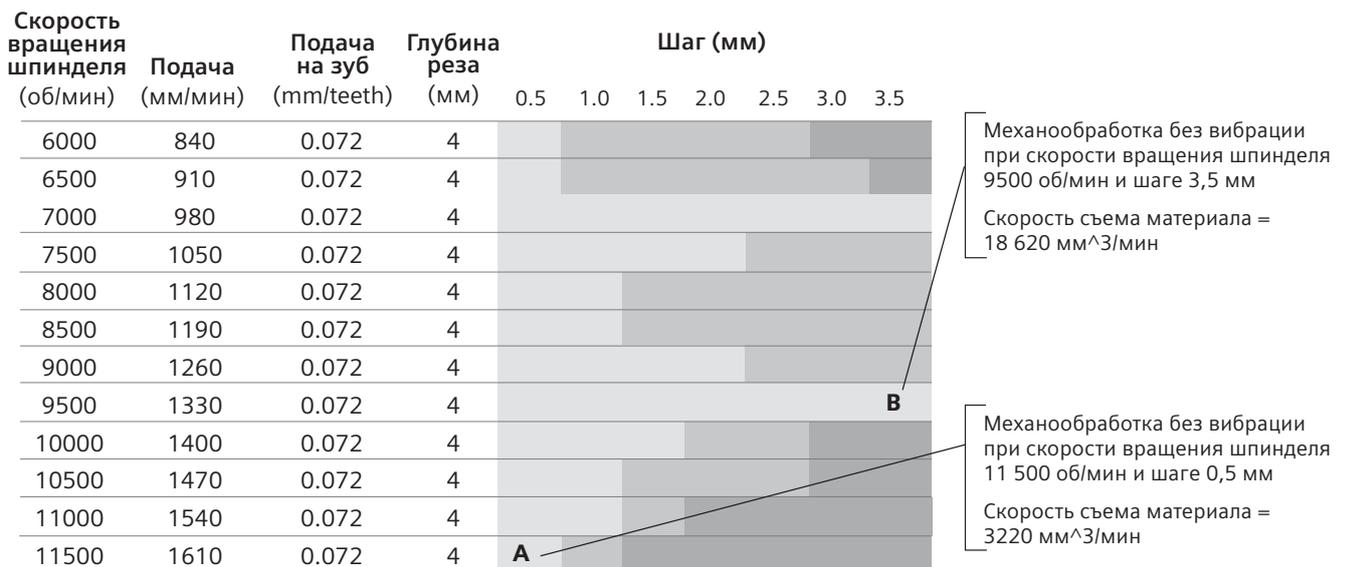


Рис. 8. Стабильные условия механообработки при более низкой скорости вращения шпинделя и увеличенной глубине реза оказываются эффективнее, чем обработка при высокой скорости вращения шпинделя с меньшей глубиной реза.

## Примечания к использованию

- Соблюдайте в работе привычные, повторяющиеся условия (например, производите затяжку цангового держателя всегда с одним и тем же крутящим моментом). Это должно выполняться для всех сочетаний инструмента, держателя и станка. Даже если этот совет кажется чрезмерным, он содержит ключ к успеху.
- Зоны наилучшего резания применяются для других материалов заготовок без изменения. Соответствующая максимальная глубина реза и значения шага изменяются.
- Инструмент может быть заменен аналогичным от того же изготовителя. Результаты применимы к аналогам. Это также касается и держателей инструмента.
- Задаваемое значение длины инструмента должно быть как можно ближе к величине, использованной при испытаниях.
- Допускается увеличение глубины реза при одновременном соответствующем уменьшении шага и наоборот.
- Не используйте представленные здесь сведения при обработке деталей с тонкими стенками, поскольку в процессе механообработки изменяется собственная частота заготовки.

## О компании Siemens PLM Software

Siemens PLM Software, подразделение Siemens Industry Automation Division, ведущий мировой поставщик программных средств и услуг по управлению жизненным циклом изделия (PLM).

Компания имеет 6,7 млн инсталлированных лицензий более чем в 63 000 компаниях по всему миру. Штаб-квартира Siemens PLM Software расположена в г. Плано, штат Техас. Siemens PLM Software сотрудничает с компаниями и предоставляет им открытые решения, позволяющие превращать идеи в успешные изделия. Дополнительную информацию о продуктах и услугах компании Siemens PLM Software можно найти на корпоративном веб-сайте: [www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm).

### Siemens PLM Software РФ

#### Москва

123610, г. Москва,  
Центр Международной  
Торговли,  
Краснопресненская наб.,  
12, 3 подъезд, офис 507.  
Тел.: +7 (495) 967-07-73,  
факс: +7 (495) 967-07-75

#### Санкт-Петербург

191186, г.  
Санкт Петербург,  
Волынский переулок,  
1/36, офис 904-1.  
Тел./факс:  
+7 (812) 336-70-15

#### Екатеринбург

620078, г.  
Екатеринбург,  
ул. Коминтерна,  
16, офис 809.  
Тел.:  
+7 (343) 356-55-27,  
факс:  
+7 (343) 356-55-28

#### Белгород

308000, г. Белгород,  
ул. Менделеева,  
14, офис 108.  
Тел./факс:  
+7 (4722) 37-67-49

[www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm)

© Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2010 г. Все права защищены. Siemens и логотип Siemens являются зарегистрированными товарными знаками Siemens AG. D-Cubed, Femap, Geolus, GO PLM, I-deas, Insight, Jack, JT, NX, Parasolid, Solid Edge, Teamcenter, Tecnomatix и Velocity Series являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками корпорации Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. или ее дочерних компаний в США и других странах. Все остальные логотипы, товарные знаки, зарегистрированные товарные знаки и знаки обслуживания, используемые в настоящем документе, являются собственностью соответствующих владельцев.

X11-RU 17610 10/10 L