

УДК 621.9.06-752

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,
М.В. КУЧУГУРОВ, А.Е. ЗУБАРЕВ, Запорозьє, Україна

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНОГО СТАНКА В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ВАРЬИРОВАНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ШПИНДЕЛЯ

В статті приведені результати експериментального дослідження роботи приводу головного руху токарного верстата в умовах девіації частоти обертання шпинделя. Представлені основні математичні моделі керування фактичною частотою обертання шпинделя, що застосовуються для зниження рівня автоколивань при механічній обробці.

В статье приведены результаты экспериментального исследования работы привода главного движения токарного станка в условиях девиации частоты вращения шпинделя. Представлены основные математические модели управления фактической частотой вращения шпинделя, используемые для подавления автоколебаний при механической обработке.

The results of the experimental lathe's main-drive work research in spindle speed deviation conditions are submitted. The basic mathematic models of the actual spindle speed control are presented, which are used for self-excited vibration suppressing in machining.

Точение в условиях постоянного варьирования скоростью резания является перспективным методом борьбы с автоколебаниями. Еще в середине 70-80х годов прошлого века был предложен метод механической обработки с переменной частотой вращения шпинделя для повышения виброустойчивости процесса резания, разрушая механизм регенерации [1, 2, 3]. С появлением современного металлорежущего оборудования с системой числового программного управления (ЧПУ), позволяющей в режиме реального времени управлять движениями станка, стало возможным полноценно реализовать данный способ обработки.

Главной особенностью работы привода в условиях варьирования частоты вращения шпинделя является существенное влияние сил инерции его механических частей станка. В зависимости от закона изменения скорости вращения во времени, привод главного движения не всегда способен в полной мере осуществить управление в соответствии с заданием.

Целью данной статьи является изучение возможностей работы привода главного движения в режиме постоянного варьирования частотой вращения шпинделя. В данной работе исследования проводились на токарном станке, так как шпиндель последнего, как правило, обладает наибольшей массой в сравнении со станками фрезерной группы.

Широко распространенным способом управления скоростью главного движения (модуляция) является задание синусоидального закона изменения числа оборотов [4, 5, 6], который можно выразить следующей формулой:

$$n_{\Phi} = n_{ном} \cdot \left(1 + RVA \cdot \sin \left(2\pi \cdot RVF \cdot \frac{n_{ном}}{60} \cdot t \right) \right), \text{об/мин} \quad (1)$$

где $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;

RVA – отношение амплитуды изменения фактической частоты вращения шпинделя Δn к номинальному значению $n_{ном}$;

RVF – отношение частоты модуляции F , Гц к номинальной частоте вращения шпинделя ($n_{ном}/60$, Гц);

t – время, с

Для удобства программирования и обработки результатов экспериментов в данной работе используется следующее выражение:

$$n_{\Phi} = n_{ном} + \frac{n_{ном} \cdot A}{100} \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t), \text{об/мин} \quad (2)$$

где F – частота модуляции, Гц;

A – процентное отношение амплитуды изменения фактической частоты вращения Δn к номинальному значению $n_{ном}$;

$$A = \frac{\Delta n}{n_{ном}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

Подставляя различные сочетания параметров частоты F и амплитуды A , можно определить область значений, которые привод способен выполнить в полном соответствии с заданием. Начальные исследования режима модуляции были проведены на токарном станке SBL500 TRENS при холостом вращении шпинделя без резания (рис. 1).

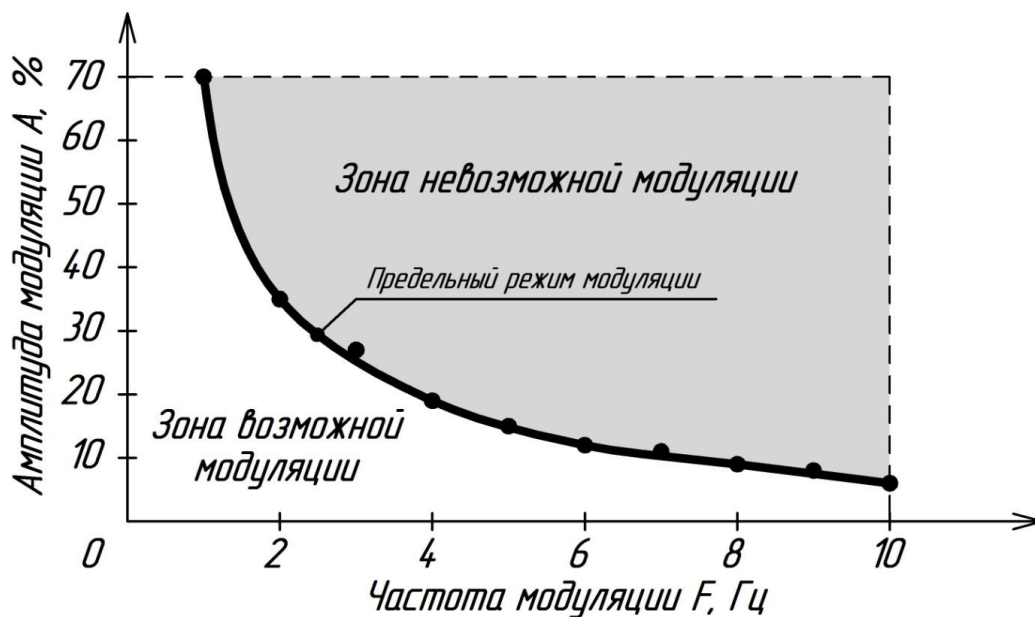


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика работы привода главного движения токарного станка SBL500 TRENS в режиме модуляции

Изучение работы привода главного движения проводилось путем подбора различных сочетаний параметров F и A . Для каждого значения частоты F определялась предельная амплитуда модуляции A , которую способен выполнить станок. Данную функцию предоставляет программный пакет стойки ЧПУ Sinumerik 840D PL «Серво-трейс», который дает возможность построить графики изменения заданной и фактической частоты вращения шпинделя во времени. Сопоставляя

последние можно определить степень выполнения приводом заданного математического закона движения.

Линия, соответствующая максимально возможной амплитуде модуляции, которую станок способен реализовать (рис. 1), делит область всех возможных значений на:

- зону возможной модуляции, каждое значение из которой привод способен выполнить с минимальным отклонением от заданных значений;
- зону невозможной модуляции – значения, при которых влияние инерции не позволяет получить заданную глубину A при данной частоте F .

В ходе исследований минимальная частота модуляции F составляла 1 Гц, так как при меньших ее значениях шпиндель способен достичь амплитуды $A = 100\%$, что означает полную его остановку при минимальной частоте вращения согласно синусоидальному закону, что является недопустимым при дальнейших исследованиях в условиях резания ввиду возможной поломке резца. Максимальное значение параметра $F = 10$ Гц выбрано исходя из недопущения перегрева привода и выхода из строя станка.

Дальнейшие исследования модуляции частотой вращения шпинделя проводились в условиях резания, когда в процессе съема припуска привод главного движения испытывает момент сопротивления. Выполнялось точение алюминиевой заготовки со следующими режимами: глубина резания $t = 2$ мм; диаметр заготовки $D = 68$ мм; подача на оборот $S_0 = 0,15$ мм; номинальная частота вращения шпинделя $n_{ном} = 500$ об/мин; резец PCLNL 2525 M12, режущая пластина CNMG 12 04 08-WR. Проведенные измерения показали, что воздействие процесса резания на работу привода в условиях модуляции меньше по сравнению с влиянием сил инерции. Полученная амплитудно-частотная характеристика режима работы станка в условиях варьирования частотой вращения шпинделя при снятии припуска полностью совпадает с характеристикой, полученной при холостом движении (рис. 1). Следовательно, работа привода главного движения в условиях модуляции в наибольшей степени зависит от массы вращающихся элементов станка и практически не зависит от внешней нагрузки процессом резания.

Современные системы числового программного управления позволяют программировать движения станка любой степени сложности. Встроенные возможности работы в режиме реального времени позволяет управлять фактической частотой вращения шпинделя согласно заданному математическому закону. Применение того или иного алгоритма обуславливается степенью снижения амплитуды автоколебаний при резании в данных условиях. Последнее будет зависеть от:

- номинальных режимов и условий обработки;
- параметров инструмента;
- массы и материала заготовки;
- инерционных свойств привода главного движения.

Примеры наиболее распространенных моделей работы привода представлены в табл. 1, 2, выполненные путем моделирования с использованием программного обеспечения MatLAB.

Рассматривая гармонический закон изменения частоты вращения шпинделя (табл. 1), задавались следующие параметры:

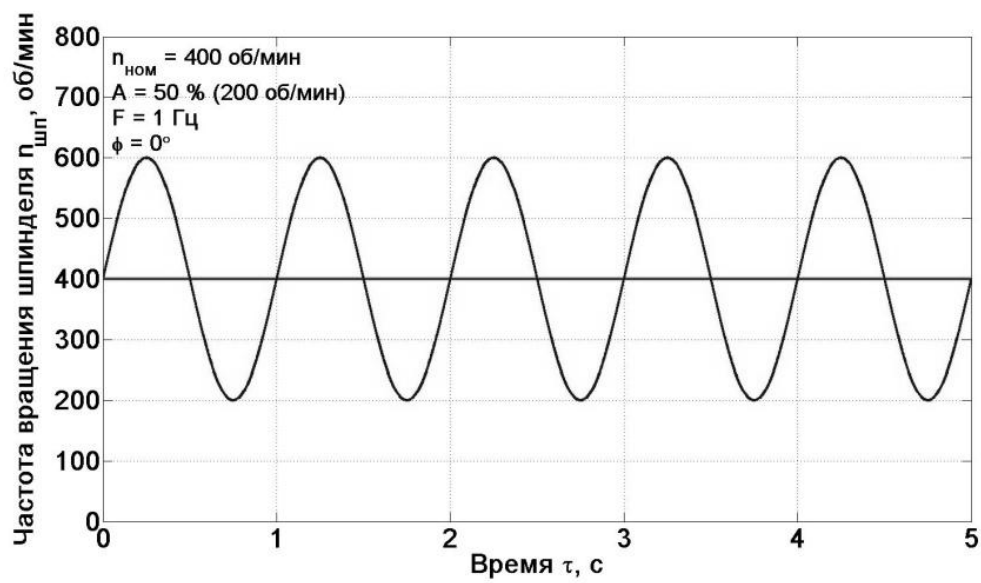
- $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;
- A , A_{amp} , A_{freq} , A_{phase} – соответственно номинальное значение, амплитуда, частота и начальное значение фазы изменения амплитуды модуляции;
- F , F_{amp} , F_{freq} , F_{phase} – соответственно номинальное значение, амплитуда, частота и начальное значение фазы изменения частоты модуляции;
- Φ – начальная фаза изменения фактической частоты вращения шпинделя.

В работе [7] предлагается в качестве высокоэффективного метода борьбы с вибрациями использование стохастической модуляции, когда величина частоты вращения шпинделя меняется во времени по случайному закону. В табл. 2 представлены результаты моделирования данного режима работы. Параметрами стохастической модуляции являются:

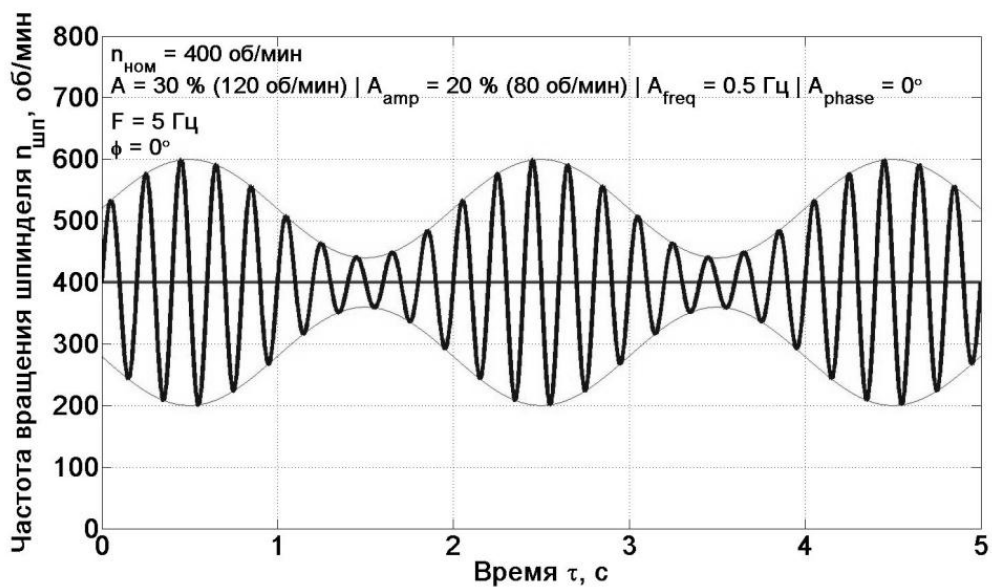
- $n_{ном}$ – номинальная частота вращения шпинделя, об/мин;
- A – максимальная амплитуда модуляции, %;
- T – период стохастической амплитудной модуляции, с.

Таблица 1 – Моделирование изменения фактической частоты вращения шпинделя по гармоническому закону

Синусоидальная модуляция

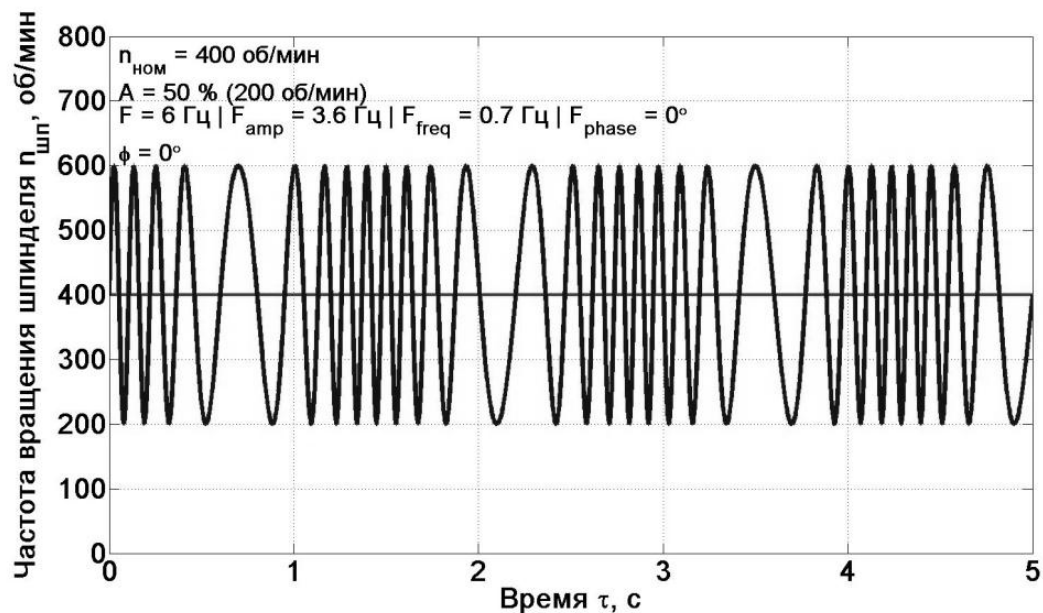


Амплитудная модуляция



Продолжение табл. 1

Частотная модуляция



Амплитудно-частотная модуляция

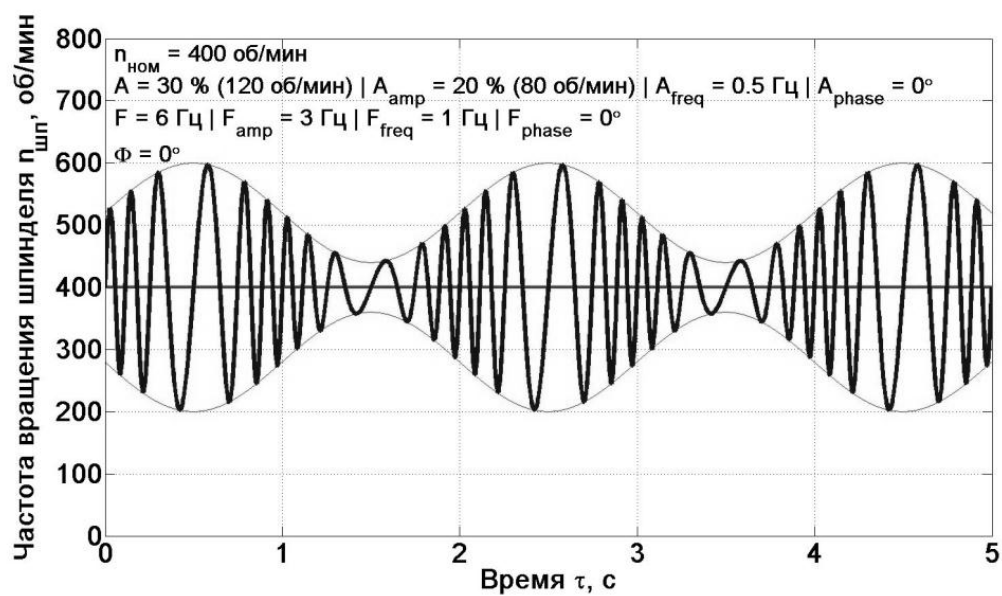
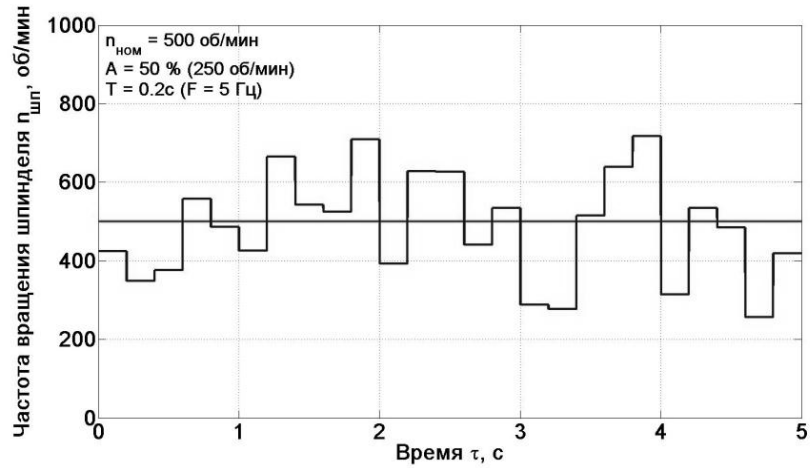
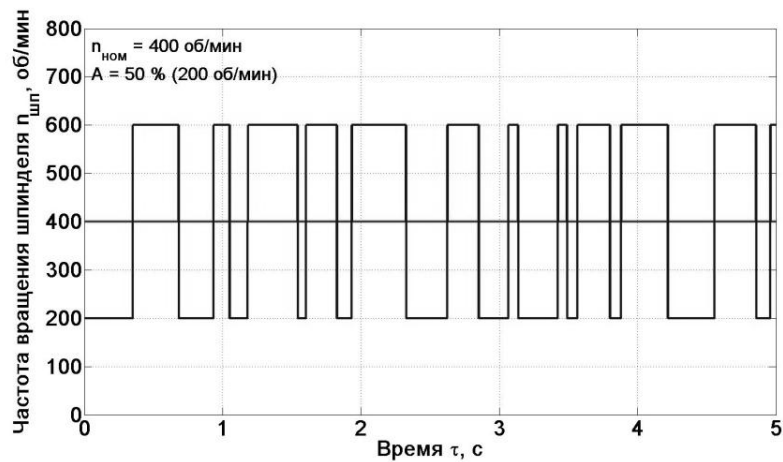


Таблица 2 – Моделирование изменения фактической частоты вращения шпинделя по стохастическому закону

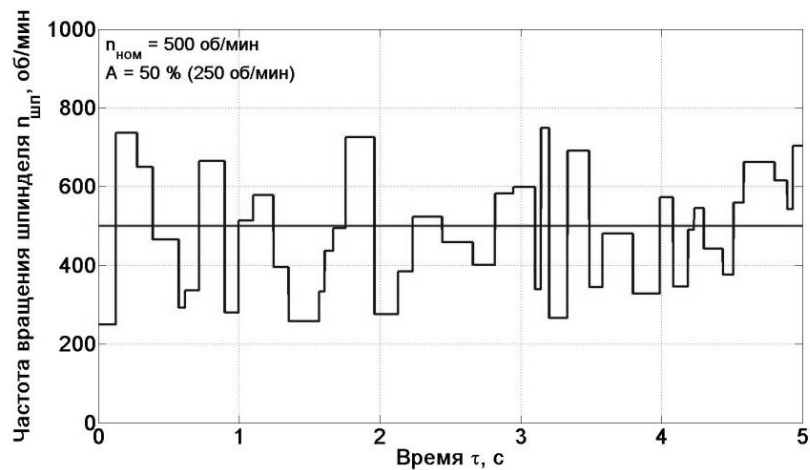
Амплитудно-стохастическая модуляция



Частотно-стохастическая модуляция



Амплитудно-частотная стохастическая модуляция



Таким образом, степень сложности алгоритма управления частотой вращения шпинделя зависит от умений и навыков исследователя, который может предложить нестандартный и эффективный подход к решению поставленной задачи. Например, в работе Афониной Н.А. [8, 9] предлагается использовать гармоническую модуляцию со стохастическим изменением амплитуды A и частоты F . Однако поиск наиболее эффективного из всех существующих требует проведения тщательных исследований, способных раскрыть понимание динамики процессов механической обработки в условиях переменной скорости резания.

С целью проверки возможностей программирования стойки ЧПУ и работы привода главного движения в смоделированных режимах, были написаны управляющие программы для токарного станка SBL500 TRENS с последующей их отработкой и измерением параметров движения. На рис. 2-6 показаны графики изменения заданной (Tr_1) и фактической (Tr_2) частоты вращения шпинделя во времени.

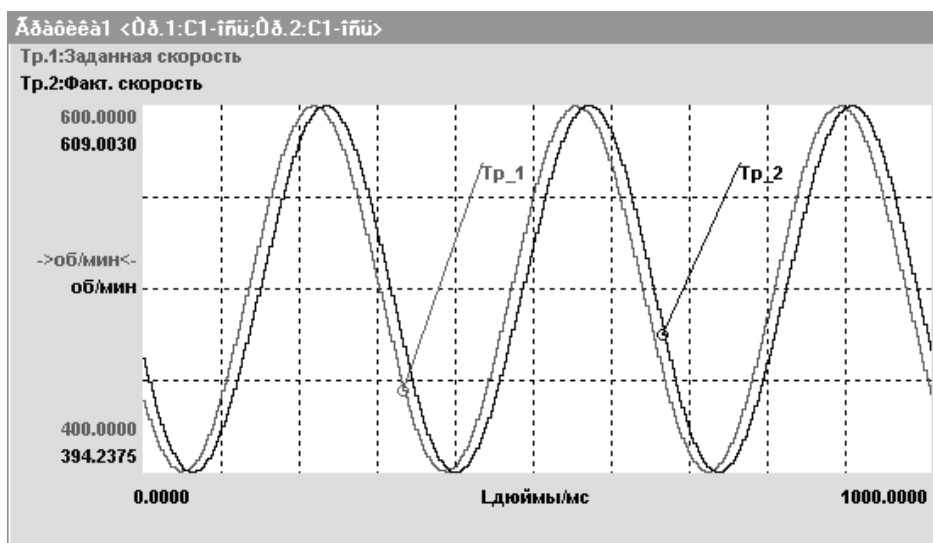


Рисунок 2 – Изменение частоты вращения шпинделя при синусоидальной модуляции:
 $n_{ном} = 500$ об/мин; $A = 20\%$; $F = 3$ Гц

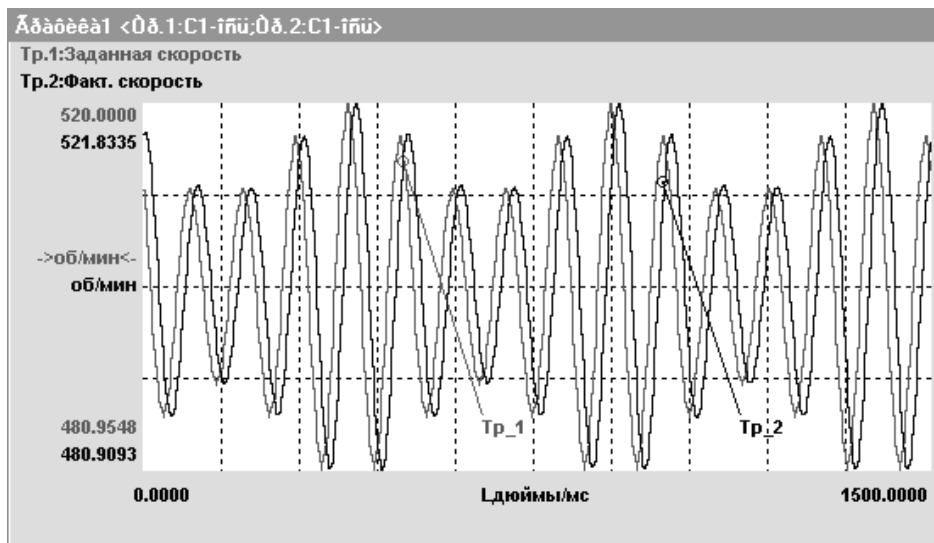


Рисунок 3 – Изменение частоты вращения шпинделя при амплитудной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 3\%; A_{\text{amp}} = 1\%; A_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц};$$

$$A_{\text{phase}} = 90^\circ; F = 10 \text{ Гц}; \Phi = 0^\circ$$

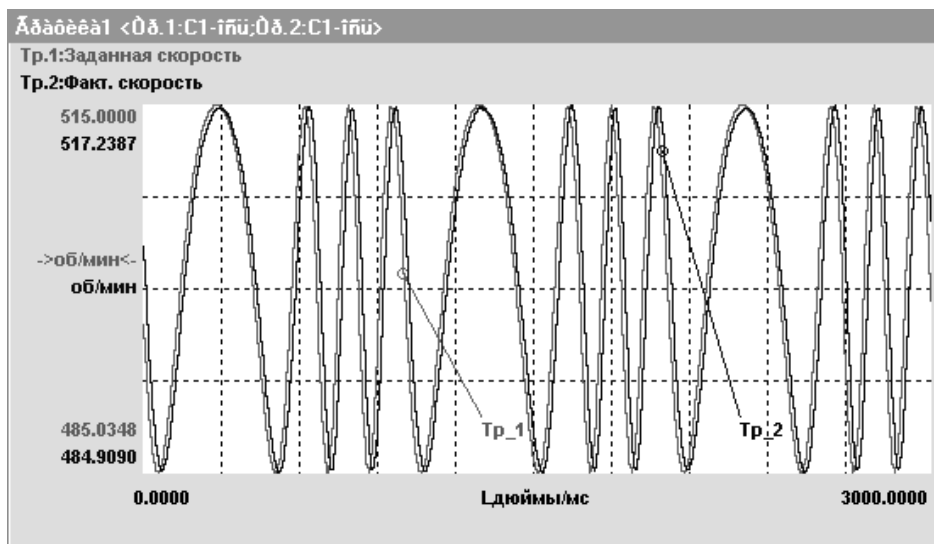


Рисунок 4 – Изменение частоты вращения шпинделя при частотной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 3\%; A_{\text{phase}} = 90^\circ; F = 4 \text{ Гц};$$

$$F_{\text{amp}} = 2,5 \text{ Гц}; F_{\text{freq}} = 1 \text{ Гц}; F_{\text{phase}} = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$$

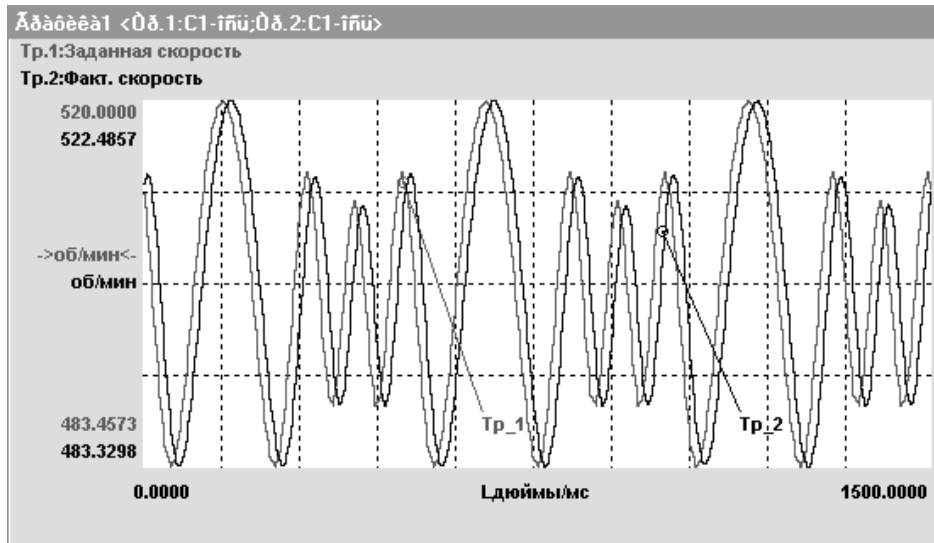


Рисунок 5 – Изменение частоты вращения шпинделя при амплитудно-частотной модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 3\%; A_{\text{amp}} = 1\%; A_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц};$$

$$A_{\text{phase}} = 270^\circ; F = 8 \text{ Гц}; F_{\text{amp}} = 4 \text{ Гц}; F_{\text{freq}} = 2 \text{ Гц};$$

$$F_{\text{phase}} = 0^\circ; \Phi = 0^\circ$$

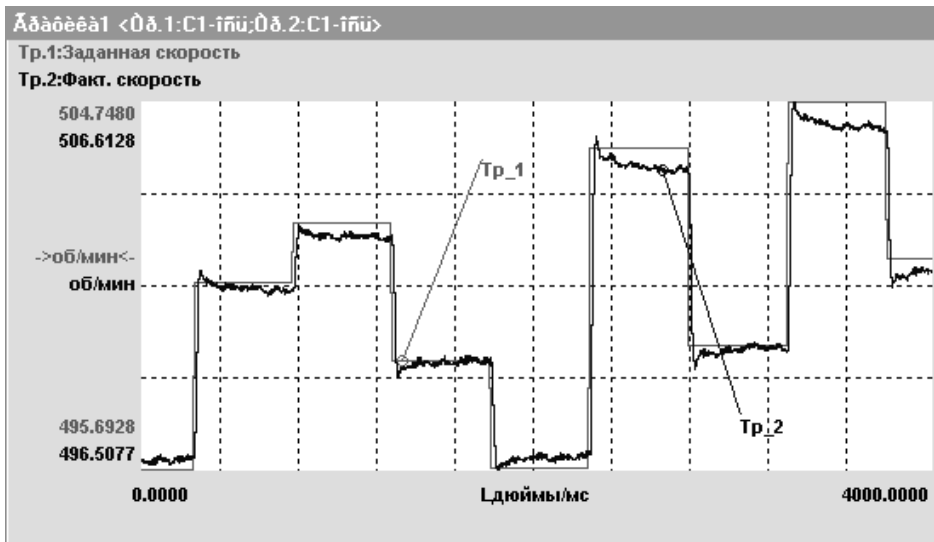


Рисунок 6 – Изменение частоты вращения шпинделя при стохастической модуляции:

$$n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/мин}; A = 20\%; F = 3 \text{ Гц}$$

Выводы. Современные металлорежущие станки позволяют выполнять механическую обработку резанием в условиях девиации скоростью вращения шпинделя. Простота программирования управления движениями станка дает возможность задавать различные математические законы изменения фактического значения данной величины. Экспериментально установлено, что в условия модуляции данной величиной процесс резания не оказывает существенного влияния на вращательное движение шпинделя, так как преобладает действие инерции его механических частей. В дальнейшем этот режим управления возможно использовать на производстве, обеспечивая безвибрационную обработку. Однако необходимо проводить дальнейшие исследования влияния различных параметров девиации на степень подавления вибраций в зоне резания.

Список использованных источников: 1. *Inamura T., Sata T.* Stability analysis of cutting under varying spindle speed / *Ann. C.I.R.P.*, 1974, Volume 23, pp. 80-85. 2. *Sexton J.S., Milne R.D. and etc.* A stability analysis of single-point machining with varying spindle speed / *Applied Mathematical Modeling*, September 1977, Volume 1, Issue 6, pp.310-318. 3. *Jemielniak K., Widota A.* Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method / *International Journal of Machine Tool Design and Research*, January 1984, Volume 24 (3), pp.207-214. 4. *Alberteli P., Musletti S. and etc.* Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases / *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2012, Volume 62, Issue 1-4, pp. 59-67. 5. *Eman A., Jun N. and etc.* Programming spindle speed variation for machining tool chatter suppression / *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, September 2003, Volume 43, Issue 12, pp. 1229-1240. 6. *Andreas O., Günter R.* Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning / *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2013, Volume 6, Issue 2, pp. 102-109. 7. *Alpay Y., Emad A. and etc.* Machine Tool Chatter Suppression by multi-level random spindle speed variation / *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, April 2002, Volume 124(2), pp. 208-216. 8. *Афонина Н.А.* Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания / Автореферат дисс., к.т.н., Тула, 2004, 21с. 9. *Афонина Н.А., Афонин А.А. и др.* Способ подавления автоколебаний при токарной обработке / Патент, RU №2 267381 С1, опубл. 10.01.2006 Бюл. №01.

Bibliography (transliterated): 1. *Inamura T., Sata T.* Stability analysis of cutting under varying spindle speed / *Ann. C.I.R.P.*, 1974, Volume 23, pp. 80-85. 2. *Sexton J.S., Milne R.D. and etc.* A stability analysis of single-point machining with varying spindle speed / *Applied*

Mathematical Modeling, September 1977, Volume 1, Issue 6, pp.310-318. 3. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method / International Journal of Machine Tool Design and Research, January 1984, Volume 24 (3), pp.207-214. 4. Alberteli P., Musletti S. and etc. Spindle speed variation in turning: technological effectiveness and applicability to real industrial cases / International Journal of Advanced Manufacturing Technology, September 2012, Volume 62, Issue 1-4, pp. 59-67. 5. Eman A., Jun N. and etc. Programming spindle speed variation for machining tool chatter suppression / International Journal of Machine Tools and Manufacture, September 2003, Volume 43, Issue 12, pp. 1229-1240. 6. Andreas O., Günter R. Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning / CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013, Volume 6, Issue 2, pp. 102-109. 7. Alpay Y., Emad A. and etc. Machine Tool Chatter Suppression by multi-level random spindle speed variation / Journal of Manufacturing Science and Engineering, April 2002, Volume 124(2), pp. 208-216. 8. Afonina N.A. Povyshenie vibroustojchivosti processa tokarnoj obrabotki na osnove upravljajemyh kolebanij skorosti rezanija / Avtoreferat diss., k.t.n., Tula, 2004, 21s. 9. Afonina N.A., Afonin A.A. i dr. Sposob podavlenija avtokolebanij pri tokarnoj obrabotke / Patent, RU №2 267381 S1, opubl. 10.01.2006 Bjul. №01.