

УДК 621.9.06:621.833

Зависимость точности кинематической настройки станков от состава набора сменных зубчатых колес

Л.И. Вереина

Впервые исследована возможность повышения точности изготовления зубчатых колес за счет выбора более точной кинематической настройки цепей однотипных станков различных моделей. Приведены примеры настройки с помощью вычислительной техники кинематических цепей зубошлифовальных станков разных моделей, имеющих различные наборы сменных зубчатых колес.

Исследование показало, что в зависимости от состава набора сменных зубчатых колес двухпарных гитар на станках одного типа, но разных моделей, можно получить различную точность обработки.

Результаты исследований и расчетов могут быть использованы для повышения точности обработки на машиностроительных предприятиях промышленности.

Ключевые слова: точность, кинематическая настройка станков.

The dependence of the kinematic accuracy of machines on the set of change gears

L.I. Vereina

The possibility for increasing the accuracy of gears by choosing a more precise set up of kinematic chains of various models of machines of the same type is investigated for the first time. Examples of using computers for setting up kinematic chains of gear-grinding machines of various models with different sets of change gears are presented. The study has shown that different models of machines of the same type can provide different working accuracy depending on the sets of change gears for two-pair guitars. The results of the research and calculations can be used to improve working accuracy at machine-building enterprises.

Keywords: accuracy, kinematic set up of machines.

При исследовании состав сменных зубчатых колес, входящих в набор, предназначенный для настройки гитар кинематических цепей металлорежущих станков с ручным управлением, назначали из следующего нормального ряда чисел зубчатых колес: 20, 23, 25, 30, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 75, 79, 80, 83, 85, 89, 90, 92, 95, 97, 98, 100, 105, 110, 113, 115, 120, 127.



ВЕРЕИНА
Людмила Ивановна
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

VEREINA
Lyudmila Ivanovna
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

В набор, прилагаемый к гитаре винторезной цепи, обязательно включали зубчатые колеса с $z = 71$, $z = 113$ и $z = 127$. При нарезании дюймовой резьбы шаг записывается в дюймах, например $P = 1/8''$. При наличии сменного зубчатого колеса $z = 127$ можно осуществить точную кинематическую настройку: $P = 1/8'' = \frac{25,6}{8} = \frac{256}{80} = \frac{127 \cdot 2}{40 \cdot 2} = \frac{127}{40}$, при отсутствии колеса с $z = 127$ точная настройка данной кинематической цепи невозможна.

При нарезании модульной резьбы, когда в записи шага используется иррациональное число π , например, $P = \pi t = 2\pi$, необходимо в наборе иметь зубчатые колеса с $z = 71$ и $z = 113$; в этом случае погрешность настройки наименьшая (0,00006), т. е. можно заменить π следующим соотношением: $\pi = \frac{5 \cdot 71}{113} = \frac{100 \cdot 71}{20 \cdot 113}$; при отсутствии колес с $z = 71$ и $z = 113$ погрешность настройки составляет 0,02...0,07.

В зуборезных станках, особенно в кинематических цепях деления и обката, в наборы включают дополнительно значительное число сменных зубчатых колес. Однако при этом станки разных моделей имеют различный состав сменных колес в этих наборах, что влияет на точность обработки. Так, в комплект сменных колес, прилагаемых к гитаре цепи деления зубошлифовального станка мод. 5М841, входят 50 колес со следующими числами зубьев: 36, 38, 39, 40, 42, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 57, 59, 60, 61, 64, 65, 67, 70, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98.

В комплект сменных колес, прилагаемых к гитаре цепи деления зубошлифовального станка мод. 5843, также входит 50 колес, но состав отличается: 44, 45, 48, 50, 52, 54, 56, 60, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 89, 90, 94, 97, 100, 102, 104, 105, 106, 108, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 118, 119, 120, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 132.

В технической документации к зубошлифовальным станкам указан диапазон зубьев, обрабатываемых на этом оборудовании. У большинства зубошлифовальных станков этот диапазон составляет $z = 12-200$. Это означает, что существующие наборы сменных зубчатых колес, в которых максимальное число зубьев превышает $z = 100$, не могут обеспечить точной настройки гитары деления в этом диапазоне. Реально его можно осуществить только в том случае, если набор содержит сменные зубчатые колеса с простым числом зубьев, равным или кратным любому простому числу из диапазона $z = 12-200$. С простыми числами зубьев заготовки с числом $z > 100$ точная настройка в принципе невозможна, что и было теоретически исследовано и экспериментально подтверждено в ряде работ [1–4].

На примере двух зубошлифовальных станков можно показать, что точность кинематической настройки при зубошлифовании одного и того же колеса на станках разных моделей будет неодинаковой и зависит от состава набора сменных зубчатых колес.

Для более корректного результата необходимо воспользоваться автоматизированным способом подбора сменных колес. В работе [5] предложена программа автоматизированного подбора сменных колес двухпарных гитар, однако в ней отсутствует проверка на сцепляемость. Поэтому воспользуемся программой [6], разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, которая позволяет не только сократить время подбора, но и выявить единственное передаточное отношение, наиболее близкое к заданному, которое можно реализовать в данной кинематической цепи посредством зубчатых колес, входящих в набор станка. При этом условия сцепляемости постоянно проверяются в процессе перебора всего массива чисел.

Введем формулы настройки цепей деления станков мод. 5М841 и 5843, а также условия сцепляемости сменных колес в их гитарах в программу [6]. Полученные распечатки представим в виде табл. 1 [7] и табл. 2.

Таблица 1

Окончание табл. 2

Минимальные погрешности при кинематической настройке делительной цепи зубошлифовального станка мод. 5М841

z_i	Погрешность кинематической настройки $\Delta\varphi$, угл. с, одного поворота стола для числа зубьев заготовки z								
	101	103	107	109	113	127	131	137	139
8	3,24	1,47	2,8	2,91	2,83	9,89	9,14	2,27	17,9
9	0,95	3,19	1,85	2,86	1,44	5,79	5,92	3,50	6,57
10	1,98	0,90	3,50	1,78	4,84	0,80	4,69	2,24	0,77
11	2,50	0,93	0,49	1,31	6,10	2,55	2,34	2,21	1,16
12	0,93	0,95	0,98	1,44	2,16	2,34	2,78	2,14	3,30
13	0,69	1,93	1,13	2,42	0,98	0,75	1,11	0,90	1,73
14	0,41	1,96	1,80	0,85	1,34	0,90	1,93	1,18	2,68
15	1,93	1,00	1,03	2,83	0,93	3,81	2,73	2,47	0,33
16	2,91	1,26	1,78	1,03	1,21	0,42	0,79	0,85	1,78
17	1,13	1,08	1,08	0,49	1,34	1,52	1,55	2,34	0,67
18	1,18	1,42	1,21	1,39	0,44	0,88	2,94	1,78	1,18
19	1,98	0,57	0,67	0,54	1,29	1,78	2,50	1,00	0,44
20	1,67	0,62	1,80	1,11	1,13	0,82	1,47	0,46	0,87
21	1,13	0,57	1,31	1,57	0,44	0,44	0,36	0,49	0,93
22	0,54	1,39	0,93	0,95	0,57	0,80	0,95	0,88	1,18
23	1,24	0,54	0,88	1,06	0,49	0,85	0,90	0,51	1,75
24	0,59	0,77	2,65	1,57	0,52	0,52	1,21	0,57	1,06
25	0,88	0,46	1,26	1,18	1,55	1,91	1,65	1,83	1,36
26	0,69	0,85	0,54	1,24	1,03	0,63	1,11	0,46	0,39
27	1,42	1,21	0,23	0,44	0,82	0,64	1,03	1,08	0,59
28	0,82	1,42	0,85	1,49	1,80	0,59	1,70	0,64	1,24
29	0,54	0,70	0,95	0,41	1,49	0,46	1,85	1,36	0,36
30	1,70	0,62	0,62	1,80	1,31	0,46	1,39	1,18	0,33
31	0,46	0,72	1,44	1,26	0,49	0,82	0,64	0,85	0,90

Примечания: 1. z_i — число пропускаемых при делении зубьев. 2. Погрешности приведены без указания знаков.

Таблица 2

Минимальные погрешности при кинематической настройке делительной цепи зубошлифовального станка мод. 5843

z_i	Погрешность кинематической настройки $\Delta\varphi$, угл. с, одного поворота стола для числа зубьев заготовки z								
	101	103	107	109	113	127	131	137	139
8	0,98	7,83	2,78	1,03	6,72	0,88	6,87	5,25	13,9
9	3,55	2,39	2,29	3,01	1,83	4,04	1,65	1,24	1,24
10	3,5	4,56	1,11	1,55	1,52	1,11	4,27	6,15	4,6

z_i	Погрешность кинематической настройки $\Delta\varphi$, угл. с, одного поворота стола для числа зубьев заготовки z								
	101	103	107	109	113	127	131	137	139
11	0,26	3,68	0,54	1,11	1,93	0,85	2,09	3,19	3,04
12	0,64	0,23	1,34	0,51	2,45	1,31	0,93	1,62	0,79
13	1,63	2,06	0,57	1,47	1,00	1,31	0,93	2,21	0,69
14	0,77	2,93	3,58	0,67	4,53	0,88	0,98	2,83	0,93
15	1,93	0,28	1,67	1,49	1,11	1,65	1,16	2,03	1,03
16	1,98	0,36	3,86	2,86	0,54	1,78	1,11	0,18	0,46
17	0,90	0,82	4,10	2,21	0,85	0,41	1,31	1,00	0,87
18	1,16	0,36	0,39	1,83	2,63	0,44	1,39	0,15	1,11
19	1,44	2,11	0,90	0,82	0,26	1,78	1,49	1,93	1,44
20	3,04	0,41	4,07	3,58	3,27	1,42	0,18	1,18	1,31
21	0,69	3,12	1,49	1,76	2,88	0,31	1,08	0,95	1,42
22	0,54	0,23	0,67	2,24	2,03	0,31	4,17	0,51	0,69
23	2,96	3,40	0,51	0,72	2,29	2,39	2,65	1,24	0,44
24	0,31	0,33	3,68	2,01	3,63	3,99	0,26	1,42	1,62
25	3,45	0,26	2,55	4,45	1,65	1,75	1,93	1,13	1,47
26	2,57	0,39	2,50	1,62	2,76	1,49	1,70	1,98	1,39
27	0,33	5,61	4,89	0,54	1,24	2,19	3,86	1,21	0,31
28	0,33	2,73	7,13	3,27	5,79	1,39	1,91	0,21	0,87
29	0,77	6,52	2,63	2,21	0,95	1,08	2,91	5,16	1,34
30	4,12	0,36	2,83	5,20	4,61	2,09	4,82	1,36	1,96
31	4,71	1,67	1,23	4,82	1,03	0,80	0,15	0,10	1,42
32	3,76	3,22	3,94	1,41	1,36	1,67	0,28	0,23	0,90
33	2,70	3,89	3,86	1,34	4,82	0,72	2,37	0,44	2,29
34	1,65	0,75	6,39	4,53	6,93	2,29	0,10	1,91	2,52
35	4,53	3,71	1,83	11,46	1,70	0,62	5,97	1,60	1,06
36	4,94	9,06	1,65	1,52	2,14	0,69	0,67	2,06	0,98
37	3,30	1,64	4,50	3,30	3,42	0,72	0,44	0,88	1,85
38	5,35	0,41	2,06	1,65	0,41	0,98	2,57	3,58	2,72
39	0,82	5,77	7,83	5,36	1,24	2,34	1,29	0,62	5,74
40	5,35	0,41	4,94	7,00	5,77	3,04	5,67	2,50	0,57

Примечания: 1. z_i — число пропускаемых при делении зубьев. 2. Погрешности приведены без указания знаков.

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, следует, что, например, при шлифовании зубчатого колеса с $z = 101$ на станке мод. 5М841 минимальная погрешность одного углового

поворота $\Delta\varphi$ составит 0,41 угл. с при повороте заготовки в делительном движении на $z_i = 14$. В то же время точность одного углового поворота того же зубчатого колеса можно повысить в 1,6 раза при шлифовании зубьев на станке мод. 5843 при повороте на $z_i = 11$. Зубчатые колеса с $z = 103$ и $z = 131$ на этом же станке получатся точнее в 2 раза, чем при обработке на станке мод. 5М841, а точность настройки для колеса с $z = 137$ будет выше в 3 раза. В то же время зубчатые колеса с числом зубьев 127 и 139 можно в равной степени обрабатывать на любом из этих станков.

Такой анализ, безусловно, можно выполнить только с помощью ЭВМ. В существующих таблицах [8–10] не указано при каком угловом повороте заготовки зубчатого колеса точность кинематической настройки будет наивысшая. Например, на станке мод. 5843 при повороте на $z_i = 11$ в делительном движении заготовки с $z = 101$ погрешность одного углового поворота в 20,6 раз меньше, чем при повороте на $z_i = 40$; на станке мод. 5М841 при обработке зубчатого колеса с $z = 139$ можно получить погрешность настройки в 54 раза больше, если при делении поворачивать заготовку на $z_i = 8$, а не на $z_i = 30$.

Если же подсчитать ожидаемую накопленную погрешность шага по колесу F_{pr} , то результаты будут еще более впечатляющими. Накопленная погрешность шага по колесу определяется по следующей зависимости:

$$F_{pr} = \frac{mz^2 \Delta\varphi}{413 \cos\beta}, \quad (1)$$

где m — модуль шлифуемой заготовки, мм; z — число зубьев; $\Delta\varphi$ — погрешность одного углового поворота, с; β — угол наклона зуба косозубых колес.

Вычислим по формуле (1) значения накопленных погрешностей шага по колесу при шлифовании на станке мод. 5М841 прямозубой заготовки модулем $m = 3$ мм и числом зубьев $z = 131$, а на станке мод. 5843 — косозубой заготовки с модулем $m = 5$ мм, числом зубьев $z = 101$ и углом наклона зуба $\beta = 35^\circ$. Для указанных исходных данных шлифуемых колес из табл. 1 и 2 выберем такой угловой поворот при делении,

при котором станок будет давать минимальную погрешность кинематической настройки. Так, для колеса с $z = 131$ деление нужно осуществлять через $z_i = 21$ зуб, а для $z = 101$ — через 11 зубьев.

Подставив в зависимость (1) соответствующие значения, получим, что при обработке на станке мод. 5М841 зубчатого колеса с $z = 131$ накопленная погрешность по колесу составит 45 мкм, а при обработке косозубого колеса с $z = 101$ на станке мод. 5843 — 39 мкм. Согласно ГОСТ 1643–81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» вычисленные погрешности соответствуют для прямозубого колеса с $z = 131$ 6-й степени по нормальным кинематической точности, а для косозубого колеса с $z = 101$ — 5-й степени. Поскольку помимо рассмотренной погрешности, вызванной вынужденно неточно настроенной гитарой деления, при обработке возникнут и другие отклонения, то реально можно обеспечить в этом случае лишь 7-ю степень точности по ГОСТ 1643–81.

Когда требуется более высокая кинематическая точность, необходимо изготовление дополнительного сменного зубчатого колеса в гитару с числом, равным числу зубьев шлифуемой заготовки, или финишная обработка на станке другой модели, в частности на станке мод. 5831.

Выше представлен расчет кинематической настройки, выполненной с помощью ЭВМ и заведомо максимально возможной точности. Предположим, не имея программы, для шлифования прямозубого колеса с $z = 109$ на станке мод. 5843 выбран угол поворота $z_i = 35$ (см. табл. 2). В этом случае для модуля $m = 5$ мм накопленная погрешность по колесу на основании (1) составит

$$F_{pr} = 5 \cdot 109^2 \cdot 11,46 / 413 = 1\,644 \text{ мкм.}$$

Если же взять угол поворота, соответствующий 12 зубьям, то на том же станке у одного и того же зубчатого колеса накопленная погрешность будет в 22 раза меньше, всего 73,35 мкм, а при обработке на станке мод. 5М841 при угловом повороте $z_i = 27$ — еще меньше.

Выводы

1. Для повышения точности обработки кинематическую настройку станка необходимо осуществлять с использованием вычислительной техники.

2. При выборе оборудования следует про- считывать настройку кинематических цепей для нескольких имеющихся на производстве моде- лей с различным составом набора сменных зуб- чатых колес, после чего назначать в технологи- ческой карте тот станок, который сможет дать наибольшую точность обработки.

3. При проектировании набора сменных зубчатых колес для зубообрабатывающих стан- ков (особенно для цепи деления) нужно преду- сматривать его с достаточно большим числом $z_{\text{см}}$, в том числе с простым числом более 100.

Литература

[1] Вереина Л.И., Фрадкин Е.И. Повышение точно- сти зубошлифования плоским кругом с двусторон- ним коническим профилем. *Станки и инструмент*, 1992, № 5, с. 13—16.

[2] Фрадкин Е.И., Колобанов М.В., Вереина Л.И. Зави- симость погрешностей шага зубчатого колеса от точности настройки гитары деления зубошлифовального станка. *СТИН*, 1993, № 5, с. 7—10.

[3] Фрадкин Е.И. Повышение точности зубошлифова- ния оптимальным делением. *Вестник машиностроения*, 1995, № 8, с. 22—27.

[4] Вереина Л.И., Фрадкин Е.И. Уменьшение шаговых погрешностей при зубо- и шлицешлифовании за счет опти- мального деления. *СТИН*, 1997, № 11, с. 16—21.

[5] Muren H. Racunanje menjalnih Zobnikob. *Strojniški vestnik*, 1984, no. 1, pp. 14—15.

[6] Вереина Л.И. Подбор сменных зубчатых колес гитар металлорежущих станков с помощью ЭВМ. *Ji CHUANG (MACHINE TOOLS)*, CHINA, 1993, № 2, с. 30—32.

[7] Вереина Л.И. Резервы повышения точности на зубо- шлифовальном станке мод. 5M841. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 10, с. 75—77.

[8] Левашов Н.Д. *Универсальные таблицы для подбора зубчатых колес металлорежущих станков*. Киев, Техника, 1979, 248 с.

[9] Петрик М.И., Шишков В.А. *Таблицы для подбора зуб- чатых колес*. Москва, Машиностроение, 1973, 527 с.

[10] Сандаков М.В., Вегнер В.А., Вегнер М.К. *Таблицы для подбора шестерен*. Москва, Машиностроение, 1988, 571 с.

References

[1] Vereina L.I., Fradkin E.I. Povyshenie tochnosti zuboshlifovaniia ploskim krugom s dvustoronnim konicheskim profilem [Increasing the accuracy of gear grinding a flat circle with double-sided conical profile]. *Stanki i instrument*. [Machines and Tooling]. 1992, no. 5, pp. 13—16.

[2] Fradkin E.I., Kolobanov M.B., Vereina L.I. Zavisimost' pogreshnosti shaga zubchatogo koleasa ot tochnosti nastroi-ki gitary deleniia zuboshlifoval'nogo stan-ka [The dependence of the gear pitch error on the accuracy of the guitar tuning division gear grinding machine]. *STIN* [Machines and Tooling]. 1993, no. 5, pp. 7—10.

[3] Fradkin E.I. Povyshenie tochnosti zuboshlifovaniia optimal'nym deleniem [Increasing the accuracy of gear grinding optimal division]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 1995, no. 8, pp. 22—27.

[4] Vereina L.I., Fradkin E.I. Umen'shenie shagovykh pogreshnosti pri zubo- i shlitseshlifovanii za schet optimal'nogo deleniia [Reducing stepping errors in the tooth-and shlitseshlifovanii through the optimal division]. *STIN* [Machines and Tooling]. 1997, no. 11, pp. 16—21.

[5] Muren H. Racunanje menjalnih Zobnikob. *Strojniški vestnik*, 1984, no. 1, pp. 14—15.

[6] Vereina L.I. Podbor smennykh zubchatykh koleas gitar metallovezhushchikh stankov s pomoshch'iu EVM [Selection of replacement gears guitars machine tool by computer]. *Ji CHUANG (MACHINE TOOLS)*, CHINA, 1993, no. 2, pp. 30—32.

[7] Vereina L.I. Rezervy povysheniia tochnosti na zuboshlifoval'nom stanke mod. 5M841 [Reserves to improve the precision of gear grinding mod. 5M841]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 10, pp. 75—77.

[8] Levashov N.D. *Universal'nye tablitsy dlia podbora zubchatykh koleas metallovezhushchikh stankov* [Universal table for selection of gear cutting machines]. Kiev, Tekhnika publ., 1979. 248 p.

[9] Petrik M.I., Shishkov V.A. *Tablitsy dlia podbora zubchatykh koleas* [Tables for the selection of gears]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 527 p.

[10] Sandakov M.V., Vegner V.A., Vegner M.K. *Tablitsy dlia podbora shesteren* [Tables for the selection of gears]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 571 p.

Статья поступила в редакцию 13.06.2013

Информация об авторе

ВЕРЕИНА Людмила Ивановна (Москва) — доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vli32@ya.ru).

Information about the author

VEREINA Lyudmila Ivanovna (Moscow) — Associate Professor of «Metal Cutting Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vli32@ya.ru).