

*Е.И. ЗИНЧЕНКО*, науч. сотр., канд. техн. наук,

*Г.А. КРОТЕНКО*, науч. сотр., *И.Я. ХРАМЦОВА*, науч. сотр., НТУ „ХПИ”

## ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ

У статті розкриті проблеми синтезу механізмів за період з 1930 року і по сьогоднішній час. Наведено бібліографію існуючих методів, груп і напрямків синтезу механізмів, зроблені висновки. Показані переваги та недоліки методів синтезу шарнірно-важільних механізмів. Розглянуто проблеми синтезу механізмів з вистоями, а також механізмів високих класів.

In the article the problems of synthesis mechanisms in the period since 1930 year and to present to day are open. Bibliography of available methods, groups and directions synthesis mechanisms and deduction are adduced. Advantages and defects of methods synthesis link-lever mechanisms are demonstrated. The problems of synthesis mechanisms with the stop and problems of synthesis mechanisms high classes are reconsidered.

**Введение.** Задача о построении механизма, который сможет удовлетворить всем наперед заданным условиям, издавна и по сей день интересует механиков. В сущности, она является одной из главнейших, если не самой главной, в кинематике механизмов.

**Проблемы синтеза с 1930 года и по настоящее время.** Со второй половины 30 годов 20 столетия основной тематикой исследования являлись вопросы структуры и классификации механизмов, кинематика и кинетостатика плоских и пространственных рычажных механизмов. В значительно меньшей мере изучался синтез механизмов.

Тематика исследований изменяется уже во время Великой Отечественной войны. Большое значение начинают приобретать проблемы синтеза механизмов. Большие научные группы работают в Грузии и во многих других союзных республиках. Вопросы синтеза механизмов изучаются также в Армении, Узбекской ССР. В 60-70-х годах советская школа теории машин и механизмов являлась самой сильной в мире и по своему составу, и по охвату исследуемых проблем, и по качеству полученных результатов. В Советском Союзе выполнялось 50% всех работ по теории машин и механизмов.

В это же время вопросы синтеза механизмов составляли основную тематику исследований немецкой школы механики машин (как в ГДР, так и в ФРГ). Здесь развивалось классическое наследие Бурместера, Альта и Грюблера: систематика и классификация механизмов, экспериментальный синтез механизмов, синтез шарнирных, зубчатых и кулачковых механизмов [1].

Советским читателям, которые интересовались задачами синтеза механизмов, было хорошо известно имя В. Лихтенхельдта – члена Академии наук ГДР, директора института теории механизмов, точной механики и текстильных машин при Дрезденском техническом университете. Его многочисленные статьи (с 1931 г.) были посвящены проблемам синтеза различных механизмов ткацких станков, точного приборостроения. Но нужно от-

метить, что все же немецкая школа проявила в это время незнание русской научной литературы, что сводилось к тому, что при составлении библиографий они указывали очень малое количество русских работ, на которые опирались. Так, например, Лихтенхельдт кустарным способом выводил условие равновесия сил, приложенных к различным точкам механизма, вместо того, чтобы воспользоваться классической теоремой Н.Е. Жуковского о жестком рычаге (1964 г.).

Лихтенхельдт является ярким представителем геометрической школы Бурместера в ее наиболее чистом виде: он применяет исключительно геометрические методы решения задач синтеза [2], что резко отличает его работы от предыдущих работ в этом направлении, например, от работы Р. Бейера [3].

Важное значение в вопросах синтеза принадлежало сводным монографиям, которые подводили итог науки за тот или иной, достаточно продолжительный период времени. К таким монографиям относятся опубликованные в Германии монографии Р. Бейера “*Technische Kinematik*” (1931 г.) и “*Kinematische Getriebesynthese*” (Берлин, 1953 г.) и монография Р. Крауса “*Getriebe Aufbau*” (1952 г.).

В СССР также была опубликована сводная монография “Синтез механизмов” (1944 г.) коллективом авторов в составе: И.И. Артоболевского, З.Ш. Блоха и В.В. Добровольского. Позже вышла сводная монография “Синтез плоских механизмов” (1959 г.), авторами которой являлись И.И. Артоболевский, Н.И. Левитский, С.А. Черкудинов [4]. Эта монография отражала научные результаты, полученные за промежуток времени с 1944 года по 1959 год. Большой интерес представляет монография [5], в которой дано систематическое изложение методов синтеза рычажных механизмов, основанных на использовании кинематической и проективной геометрии, а также теории алгебраических кривых. Характерным для этой монографии является тесное сочетание геометрических и аналитических методов.

В области синтеза кулачковых механизмов велись и продолжают вестись работы по уточнению выбора закона ведомого звена и определению основных размеров. В результате многочисленных исследований выяснилось, что этот закон следует выбирать не только с учетом заданных кинематических и динамических величин, но и с учетом технологии изготовления кулачка и достижимой точности воспроизведения его профиля. Накопленные данные по связи точности воспроизведения профиля кулачка с основными кинематическими и динамическими параметрами механизма позволили обосновать систему допусков на рабочий профиль и связанную с ней таблицу рекомендуемых законов движения ведомого звена. Можно утверждать, что предполагаемые преимущества некоторых сложных законов движения не могут быть реализованы при существующих методах обработки профиля кулачка. В этом можно убедиться, изучая материалы, помещенные в монографии [6].

Работы по синтезу комбинированных механизмов (кулачково-рычажных

зубчато-рычажных и др.) интересны тем, что они основаны на органическом слиянии методов синтеза рычажных механизмов с методами синтеза кулачковых, зубчатых и других механизмов.

В литературе достаточно полно исследованы и трехзвенные мальтийские механизмы с прямолинейными радиальными пазами. Синтезом механизмов с криволинейными пазами занимались и продолжают заниматься по настоящее время [7]. Механизмы мальтийских крестов изучались Г. Альтом, Р. Бейером, И.Э. Беккер, З.Б. Конторовичем, И.П. Варенцовым и др. Более поздние работы принадлежат Л.Н. Решетову, Е.Г. Нахапетяну и др. Н.В. Сперанский опубликовал монографию “Проектирование мальтийских механизмов” (1960 г.). Синтезом комбинированного мальтийского механизма по заданному закону движения ведомой массы в настоящее время занимается В.Р. Пасика [8].

Без сомнения, создание основ современных методов приближенного синтеза шарнирно-рычажных механизмов связано с именами П.Л. Чебышева и Л. Бурместера. П.Л. Чебышев в 1853 г. впервые сформулировал задачу приближенного синтеза шарнирно-рычажных механизмов. В последующих исследованиях он разработал метод подбора параметров кинематической схемы, при которых функция, воспроизводимая шарнирно-рычажным механизмом, имеет приближение к заданной непрерывной функции на заданном отрезке с наименьшими по модулю отклонениями. Такое приближение названо наилучшим приближением [9].

Методы синтеза шарнирно-рычажных механизмов можно подразделить на две группы [10]. В первой используются методы приближения функций, во второй – оптимизационные методы. Поиск оптимального решения во второй группе означает одновременно поиск правильной постановки задачи, при которой параметры механизмов следует искать из условия наилучшего удовлетворения требованиям технологического процесса [9]. Задачи оптимального проектирования механизмов чаще всего продолжают формулироваться как задачи наилучшего приближения функций [11, 12]. Это в какой-то степени снижает эффективность спроектированных механизмов. Метод Чебышева позволяет из множества возможных механизмов подобрать такой, который бы обеспечивал наилучшее приближение к дуге окружности или прямой. Выполнение этого условия приводит во многих случаях к неконструктивным формам механизма, а в некоторых случаях и к малому ходу по сравнению с радиусом кривизны искомого центра дуги окружности. Все эти недостатки возникают вследствие того, что решение задачи синтеза по Чебышеву основано не на уточнении параметров предварительно выбранного механизма, а на определении их, исходя из условия наименьшего отклонения от дуги окружности или прямой.

Оптимизационный синтез – сравнительно новое направление в синтезе рычажных механизмов. Монография, в которой одна из глав посвящена именно оптимизационному синтезу таких механизмов, была издана в 1988 году. Ее авторами являются Э.Е. Пейсах и В.А. Нестеров. Оптимизационный

синтез осуществляется на базе методов нелинейной оптимизации [13]. В настоящее время возросли сложность и комплексность проблем, возникающих и требующих решения в процессе проектирования механизмов. Современное состояние и проблемы многокритериального оптимизационного синтеза машиностроительных конструкций подробно изложено в статье [14].

Большой интерес представляет синтез рычажных механизмов с выстоями выходных звеньев. Существующие методы синтеза рычажных механизмов с выстоями основываются на свойствах крайних положений [15, 16] и свойствах шатунных кривых шарнирного четырехзвенника. Во втором случае используют либо приближенно-прямолинейные, либо приближающиеся к дуге окружности участки шатунной кривой [17, 18].

Методы, основанные на свойствах крайних положений, использовали в своих работах В.Г. Хомченко, Э.Е. Пейсах, Р.Л. Герасименко, С.А. Черкудинов, Н.В. Сперанский и другие. В этих случаях приближенный выстой выходного звена получается за счет того, что в окрестностях предельных положений звеньев большим перемещениям предшествующих групп звеньев соответствуют существенно меньшие перемещения последующих. Двух-, трехкратное использование этого эффекта обеспечивает выстой выходного звена рычажного механизма с требуемой точностью.

Одной из разновидностей этого способа получения приближенных выстоев является последовательное соединение простейших рычажных механизмов (например, четырехзвенных), проходящих на интервалах остановок через свои предельные положения. Приближенный выстой в этих механизмах получается за счет того, что в шарнирном четырехзвеннике малым углам поворота выходного звена вблизи его крайнего положения соответствуют значительно большие углы поворота входного звена [19].

Методы, которые используют либо приближенно-прямолинейные, либо приближающиеся к дуге окружности участки шатунной кривой, использовали в своих работах Чебышев П.Я., Левитский Н.И., Черкудинов С.А., Гродзенская Л.С., Киницкий Я.Т. и другие.

Задача о построении механизма, воспроизводящего некоторую кривую, встала перед учеными еще в середине 19 – го века.

Большой вклад в развитие идеи синтеза шарнирных механизмов с выстом (выстоями) внес Хомченко В.Г. Задачу синтеза таких механизмов он решал разными способами. В одних работах одним из основных условий синтеза считается обеспечение наиболее точного выстоя выходного звена, в других – обеспечение циклограммы работы машины, а не точность выстоя [20, 21].

Перейдем к рассмотрению второго метода синтеза рычажных механизмов, основанного на свойствах шатунных кривых шарнирного четырехзвенника. В этом случае задача синтеза сводится к синтезу направляющего механизма, т.е. механизма, который должен обеспечить заданную форму шатунной кривой.

Синтезом направляющих механизмов занимались многие ученые. Аналитическое решение задачи второго метода синтеза делится на несколько

направлений:

- 1) синтез механизмов, точно воспроизводящих заданное движение;
- 2) синтез механизмов, дающих приближенное решение;
- 3) геометрический синтез, основанный на кинематико-геометрических исследованиях различных геометрических мест, определяемых движением отдельных точек механизмов [1].

Задачу первого направления решали Ш. Н. Поселье, Л. И. Липкин, С. Робертс, Г. Гарт, А.Б. Кемпе, Дж. Сильвестер и др. П.Л. Чебышев является основоположником второго, приближенного направления в решении задач о воспроизведении заданной кривой. Приближенный метод, основанный на теории наилучшего приближения функций, получил развитие в работах З.Ш.Блоха, Н.И.Левитского, С.А.Черкудинова [9, 22]. Идеи Чебышева П.Л. легли в основу работ по синтезу советских ученых Артоболевского И.И., Добровольского В.В. и др. Основоволожником третьего направления синтеза (геометрического) является Л.Бурместер. Его последователи – Г.Альт, Р.Бейер, В. Лихтенхельдт, К.Хайн, И.Фольмер и др. [23].

Альт и Флоке положили начало еще одному методу решения задач синтеза механизмов, так называемому динамическому синтезу.

Исследования механизмов второго класса, сообщающих выходному звену движение с приближенным выстоем, продолжают уже более 100 лет, начиная с работ П.Л. Чебышева по синтезу  $\lambda$ -образных механизмов. По этим работам защищены ряд докторских диссертаций (в последнее время – В.Г. Хомченко и Я.Т. Киницкий) и много кандидатских диссертаций (в последнее время – В. А. Харжевский). В настоящее время хорошо разработаны методы синтеза механизмов второго и третьего классов. Синтез механизмов более высоких классов находится на первоначальной стадии развития. Большой вклад в этой области сделали и продолжают делать У.А. Джолдасбеков, К.С. Иванов, Г.У. Уалиев, В.Г. Хомченко, Е.С. Гебель, Е.В. Солонин, Е.И. Зинченко [24, 25, 7]. Преимущества механизмов высоких классов по нагрузочной способности и функциональным возможностям подтверждено и доказано ранее многими учеными, например, академиком У.А. Джолдасбековым, В.Г. Хомченко, Я.Т. Киницким, Д.А. Кинжебаевой [26] и др.

**Выводы.** Как видно из перечисленных ссылок на работы, которые касаются синтеза механизмов, этот вопрос интересовал и интересует по сей день ученых. Проектирование новых механизмов ведется исходя из обеспечения преимуществ по различным критериям работы или движения. Так, например, есть стремление замены кулачковых механизмов рычажными, механизмов низких классов – механизмами более высоких классов.

Наиболее полная библиография работ по теории механизмов и машин, в частности, по синтезу механизмов, охватывающая период от 30-х до 60-х годов 20 столетия, приведена К. Хайном в его курсе “Прикладная теория механизмов” (1961 г.). Библиография работ по истории механики машин, а также списки основных трактатов и учебной литературы в хронологическом поряд-

ке приведены в книге А.Н. Боголюбова “История механики машин” (1964 г.). Многие вопросы истории теории механизмов и машин и до настоящего времени остаются неизученными, особенно это касается истории отдельных школ и направлений.

**Список литературы:** 1. *Боголюбов А.Н.* Развитие проблем механики машин. – К.: Наукова думка, 1967. – 291с. 2. *Лихтенгельдт В.* Синтез механизмов. – М.:Наука, 1964. – 227 с. 3. *Бейер Р.* Кинематический синтез механизмов. – К.: Машгиз, 1959. 4. *Артоболовский И.И., Левитский Н.И., Черкудинов С.А.* Синтез плоских механизмов. – М.: Гос.изд-во физ.- мат.лит-ры,1959. – 1084 с. 5. *Геронимус Я.Л.* Геометрический аппарат теории синтеза плоских механизмов. – М.: Изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1962. 6. *Лившиц Б.И.* Технология изготовления и сборки кулачковых механизмов. – М.: Машгиз, 1963. 7. *Зинченко Е.И.* Кинематический синтез шестизвенных механизмов четвертого класса с выстойм выходного звена: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Харьков. – 2007. –176 с. 8. *В.Р. Паска.* Синтез комбінованого мальтійського механізму з пружним валом за заданим законом руху веденої маси // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків, 2007. – Вип. 29. – С.95-108. 9. *Черкудинов С. А.* Синтез плоских шарнирно-рычажных механизмов. – М.: Изд-во академии наук СССР, 1959. – 323 с. 10. *Новгородцев В.А.* Некоторые вопросы оптимального проектирования механизмов при помощи ЭВМ // Теория механизмов и машин. – Харьков: Выща школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1979. – Вып.27. – С. 104-111. 11. *Харжевський В. О.* Синтез важільних прямолінійно-напрямних механізмів та механізмів із зупинкою вихідної ланки на базі шарнірного чотириланкового механізму: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Хмельницький – 2004. – 262 с. 12. *Харжевський В.О., Кіницький Я.Т.* Чисельно-аналітичний метод синтезу важільних механізмів з зупинкою вихідної ланки на базі несиметричного шарнірного чотириланкового механізму з використанням точок Болла // Вісник Технол. у-ту Поділля. – Хмельницький: ТУП, 2003. – №4. – С.43-54. 13. *Лейсах Э.Е., Нестеров В.А.* Система проектирования плоских рычажных механизмов. – М.: Машиностроение, 1988. – 232 с. 14. *Кіндрацький Б., Сулим Г.* Сучасний стан і проблеми багатокритеріального синтезу машинобудівних конструкцій (огляд) // Машинознавство. – Львів. – 2002. – №10. – С.26-40. 15. *Лейсах Э. Е., Герасименко Р. Л.* Аналитический синтез восьмизвенного плоского шарнирного механизма с двумя выстоями ведомого звена в крайних положениях / Ленингр. политехн. ин-т. – Л. – 1982. – 31с. – Деп. в ВИНТИ. 16. *Nerge G.* Zur Konstruktion von Rastgetrieben unter Ausnutzung der Totlagenwirkung. – Mabau. Wiss. Z. TH Dresden, 1956/57. – H.2. –S. 279-282. 17. *Чебышев П. Л.* Теория механизмов, известных под именем параллелограмов // Полн.собр.соч. – М.; Л.:Изд-во АН СССР, 1947. – Т. 2. – С. 23-51. 18. *Чебышев П. Л.* О простейшей суставной системе, доставляющей движения, симметрические около оси // Полн. собр. соч. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – Т. 4. – С.167-211. 19. *Котляр Е.И., Новгородцев В.А., Соболев А.Н.* Проектирование исполнительных механизмов с выстоем выходного звена // Материалы Междунар. научно-техн. конф. “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – 1996. – С.39-42. 20. *Хомченко В. Г.* Аналитический синтез шестизвенных шарнирных механизмов с одной приближенной остановкой выходного звена по заданной циклограмме // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – №6. – С.47-50. 21. *Хомченко В. Г.* Аналитический синтез кинематических схем шести- и восьмизвенных шарнирных механизмов с одной остановкой выходного звена по заданной циклограмме // Изв. вузов. Машиностроение. – 1985. – №5. – С.40-43. 22. *Блох З. Ш.* Приближенный синтез механизмов. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с. 23. *Alt H.* Uber Totlagen des Gelenkvierecks // Zeitschr fur angewandte Mathematik Und Mechanik, 1925. – Bd.Y. – S.337-346. 24. *Джолдасбеков В. А., Иванов К. С.* Синтез плоских рычажных механизмов четвертого класса // Теория механизмов и машин (материалы I Всесоюзного съезда). – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1977. – С.12. 25. *Хомченко В. Г., Гельб Е.С., Солонин Е.В., Солонин В.В.* Кинематический синтез и анализ рычажных механизмов 4 класса с выстоем выходного звена по заданной циклограмме // Материалы 12 Мирового Конгресса по ТММ. – Безансон. – 2007. – С.626-631. 26. *Кинжебаева Д.А.* Анализ движения рычажных механизмов 4 класса с выстоем ведомых звеньев: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Казахстан – 2005.

Поступила в редколлегию 05.03.2008