

# Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание  
МОО «Стратегия объединения»  
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,  
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2023. № 4. С. 30 – 42.

DOI:

Представлена в редакцию: 08.10.2023

Принята к публикации: 17.10.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621. 437.3

## Синтезирование механизма преобразования неравномерного вращательного движения роторов в равномерное вращение выходного вала роторно-лопастного двигателя

Зайцев А.А.

[a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru)

ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493),  
Российская Федерация

---

Приведены результаты синтеза механизма, преобразующего неравномерное вращательное движение роторов в равномерное вращение выходного вала роторно-лопастного двигателя (РЛД). Преобразование осуществляется роликово-кулачковым механизмом и связанным с ним симметричным дифференциальным планетарным редуктором. Отличительной особенностью механизма является оригинальный профиль кулачков, который обеспечивает необходимую синхронизацию вращения роторов с периодическими остановками, что позволяет создать наилучшие условия для передачи крутящего момента с роторов на выходной вал двигателя. Дана наглядная сопоставительная оценка эффективности механизмов, реализующих схему преобразования с останавливаемыми роторами и гармонично-синусоидальную схему. Критерием оценки обоснован коэффициент трансформации крутящего момента.

Показаны направления дальнейших исследований в области создания РЛД с высокими удельными показателями.

---

**Ключевые слова:** роторно-лопастной двигатель, механизм преобразования, синхронизация роторов, коэффициент трансформации крутящего момента.

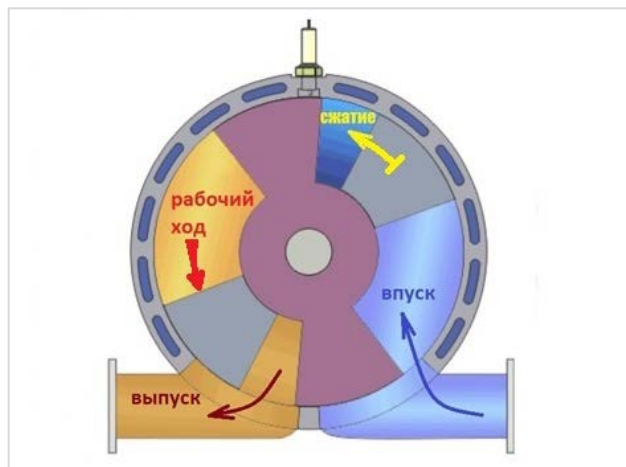
---

## Введение

Роторно-лопастные двигатели (РЛД) представляют одно из направлений в конструировании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с высокими удельными показателями. Теоретически принципиальная схема РЛД (см. рисунок 1) позволяет создавать в 4-5 раз более компактные двигатели, нежели поршневые с равным рабочим объемом. Это достигается реализацией всех четырех тактов (впуск, сжатие, сгорание и расширение, выпуск) рабочего цикла ДВС за один оборот выходного вала. Кроме того, имеются предпосылки к обоснованию возможности создания РЛД с лучшими показателями

---

преобразования энергии сгорания топлива в механическую работу, чем это возможно с использованием кинематической схемы с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) либо другим эксцентриковым приводом движения поршня или лопасти.



**Рис. 1.** Принципиальная схема роторно-лопастного двигателя

Однако более чем вековой опыт создания РЛД показал, что ни один из построенных опытных образцов не был доведен до стадии практического применения.

В работе [1] с целью определения причин несостоятельности предпринятых попыток проанализированы основные особенности РЛД и выявлены ключевые проблемы его создания, одна и основная из которых состоит в недостаточно эффективном и (или) недостаточно надежном способе преобразования неравномерных вращательных движений роторов в равномерное вращение суммирующего выходного вала двигателя. Основными критериями надежности механизма преобразования являются достаточная плавность изменения угловых скоростей роторов, отсутствие вибраций в механизмах, а также ударных и избыточных нагрузок на детали. Критерием эффективности преобразования является высокий коэффициент трансформации  $K_{тр}$  крутящего момента, создаваемого давлением рабочего тела на лопасти роторов, в крутящий момент на выходном валу РЛД.

Введенный в статье [1] коэффициент трансформации  $K_{тр}$  характеризует совершенство кинематической схемы механизма преобразования неравномерного вращательного движения роторов в равномерное вращение выходного вала РЛД (далее – механизм преобразования). Изменяющиеся в течение каждого такта рабочего цикла двигателя мгновенные значения коэффициента трансформации  $K_{тр}$  зависят от разности текущих коэффициентов передачи  $K_p$  крутящих моментов с роторов на выходной вал, которые находятся в прямой зависимости от значений угловых скоростей вращения роторов, приведенных к скорости вращения выходного вала РЛД. Мгновенные значения  $K_p$  роторов ( $K_{p1}$  и  $K_{p2}$ ) зависят от углов поворота роторов и алгоритма синхронизации их вращения, реализуемого механизмом преобразования.

На обращенные друг к другу поверхности лопастей обоих роторов действуют одни и те же силы давления газов, но в противоположных направлениях. Учитывая, что сумма текущих значений  $K_{p1}$  и  $K_{p2}$  всегда равна 2 и то, что суммарный крутящий момент на выходном валу формируется взаимоувязанной совокупностью разнонаправленных крутящих моментов, генерируемых на обоих роторах, окончательно для расчета текущего значения коэффициент трансформации  $K_{тр}$  получим:

$$K_{тр} = (K_{p1} - K_{p2}) / 2 . \quad (1)$$

Типизация вариантов движения роторов создала основу для классификации РЛД и конструктивных схем механизмов синхронизации, многообразие которых распределено по трем группам.

1. Группа гармонично-синусоидальных схем, включающая в себя типы механизмов, обеспечивающих плавное и непрерывное изменение по синусоиде угловых скоростей роторов в течение цикла. При этом замедление одного ротора в равной мере соответствует характеру одновременного ускорения второго ротора, а скорость замедляющегося ротора, как правило, никогда не уменьшается до нулевого значения. Недостатком механизмов данного типа является пониженный коэффициент трансформации.

Ниже будет показана причина и дано сравнение с синтезированным механизмом.

2. Группа экстремально-синусоидальных схем, включающая в себя типы механизмов, формирующих изменение угловых скоростей роторов в течение времени цикла, график которых похож на таковой у гармонично-синусоидальных схем с тем отличием, что скорость замедляющегося ротора уменьшившись до нуля затем еще на короткое время принимает отрицательные значения относительно точки отсчета (ротор совершает движение в обратном направлении). При этом графики зависимости угловых скоростей вращения роторов от углов их поворота представляют собой удлинненные циклоиды. При работе таких механизмов замедляющийся ротор после остановки в «мертвой точке» совершает кратковременное движение в обратную сторону, создавая «хлыстовой» эффект, приводящий к значительным вибрационным нагрузкам. В статье [1] показано, что данный недостаток является неустранимым и поэтому механизмы такого типа исключены из рассмотрения.

3. Группа схем синхронизации с останавливаемыми роторами. В этом случае график изменения угловых скоростей роторов в течение времени цикла состоит из попеременно чередующихся участков в виде синусоид (от 0 до 1 и от 1 до 0) и участков прямолинейных горизонтальных с нулевыми и максимальными значениями скоростей. При этом график зависимости угловых скоростей вращения лопастей от углов их поворота похож на обыкновенные циклоиды, разорванные в местах своих максимальных значений вставками горизонтальных участков, означающих сектора вращения одного из роторов с условно постоянной максимальной скоростью во время остановки второго ротора.

В исследовании [1] показано, что конструктивная схема механизма преобразования с останавливаемыми роторами является предпочтительной. Поэтому именно на этой схеме сосредоточен поиск технического решения, обеспечивающего эффективную работу механизма преобразования.

Примером конструкции РЛД с применением схемы синхронизации с останавливаемыми роторами, является двигатель Аракеловых (патент RU 2225513) [2]. В конструкции этого двигателя применен сдвоенный мальтийский механизм, в котором один крест механизма повернут относительно другого на половину угла мальтийского креста, а дифференциал преобразует вращательно-прерывистое движение роторов во вращение выходного вала двигателя с постоянной угловой скоростью. Однако недостатками этого механизма являются отсутствие плавности преобразования движения роторов во вращение выходного вала и большие ударные нагрузки в момент остановки мальтийского креста.

Известен также РЛД Трауготта Чуди (патент US 3381669А) [3]. Неравномерное вращение роторов в этом двигателе преобразуется в равномерное вращение выходного вала посредством оригинального кулачкового механизма, который позволяет реализовать схему синхронизации с останавливаемыми роторами. Однако этот механизм обеспечивает реализацию только двух рабочих циклов за один оборот выходного вала двигателя. К тому же, кулачковый механизм в исполнении Т.Чуди не обеспечил должный уровень надежности

из-за больших нагрузок на ролики, возникающих от их защемления ротором при остановке лопастей.

С целью успешной реализации преимуществ схемы синхронизации с останавливаемыми роторами автором была поставлена задача синтезировать механизм, лишенный вышеуказанных недостатков.

### Построение базовой замкнутой кривой и синтез механизма преобразования

Для решения данной задачи разработана конструкция механизма преобразования, включающая роликово-кулачковый механизм и симметричный дифференциальный планетарный редуктор (патент RU 2673318) [4].

Общая кинематическая схема дифференциально-кулачкового механизма, преобразующего неравномерное вращательное движение роторов в равномерное вращение суммирующего вала, представлена на рисунке 2.

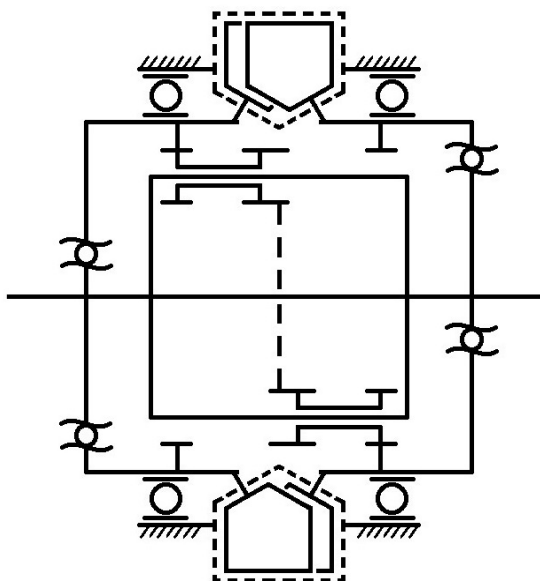


Рис. 2. Принципиальная кинематическая схема дифференциально-кулачкового механизма

Данная конструкция позволяет, при соответствующем профилировании кулачков, синхронизировать вращение роторов таким образом, что за один оборот суммирующего выходного вала двигателя дважды попеременно на требуемое расчётное время останавливается каждый из роторов, а вращающийся ротор при этом сообщает крутящий момент выходному валу посредством симметричного дифференциального планетарного редуктора.

В общем виде задача заключалась в том, чтобы замедляющийся ротор не создавал паразитных нагрузок на механизм, и с другого ротора крутящий момент снимался бы «в чистом виде» ( $K_{тр} = 1$ ). При этом не должно быть скачков скорости и ускорений, которые возбуждают упругие колебания и снижают надежность механизма. Должна обеспечиваться плавность разгона-торможения роторов и стабильность их положения в остановленном состоянии относительно корпуса РЛД.

Графики требуемого синхронного изменения угловых скоростей роторов показаны на рисунке 3.

Для профилирования кулачков, реализующих движение роторов согласно этим графикам, необходимо построить соответствующие линии в полярной системе координат и получить базовую замкнутую кривую. Результат построения показан на рисунке 4.

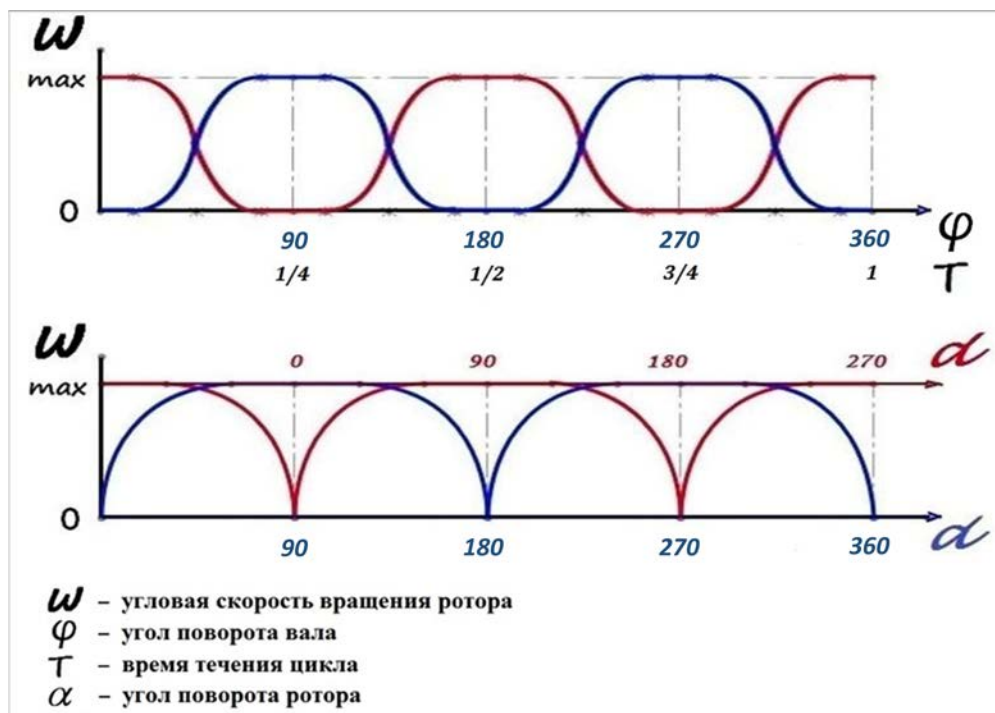


Рис. 3. Графики изменения угловых скоростей роторов

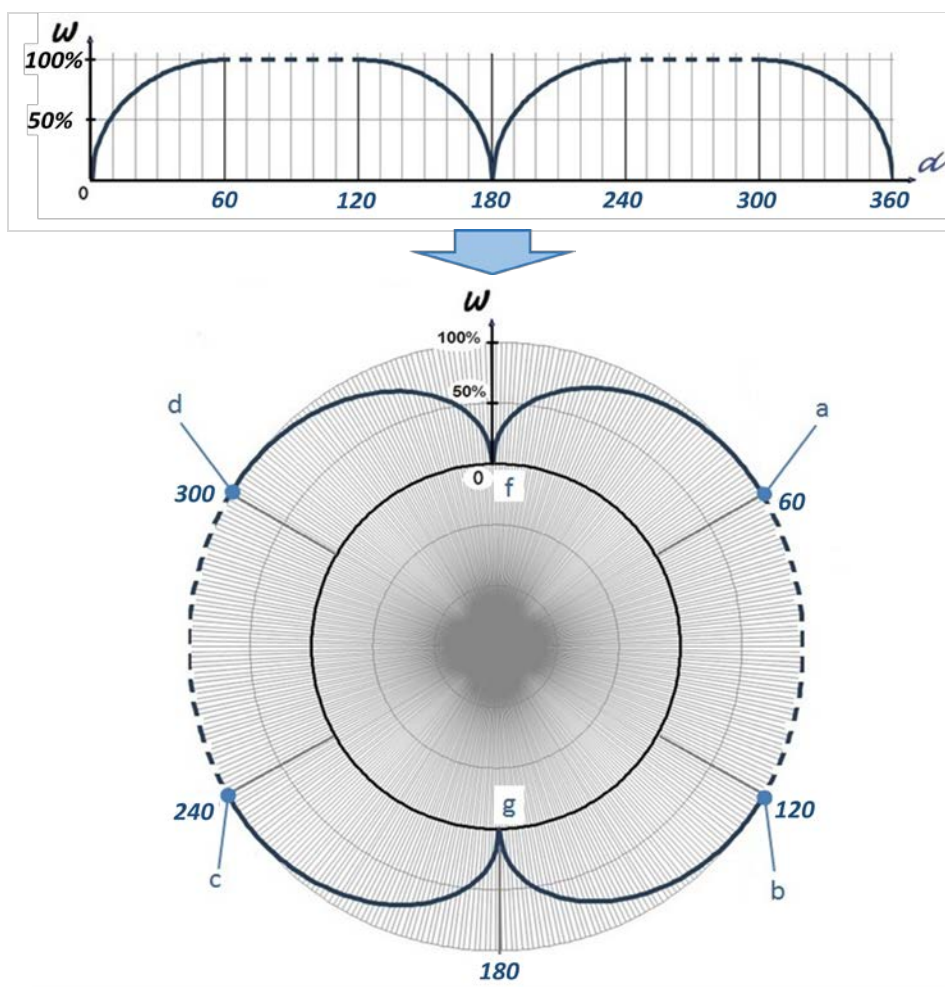


Рис. 4. Синтез базовой замкнутой кривой

Полученная базовая кривая состоит из участков с переменным радиусом (непрерывные линии на рис.4) и участков с постоянным радиусом (пунктир на рис. 4). Непрерывные линии соответствуют изменению скорости ротора между нулевым и максимальным значениями, а пунктир – вращению ротора с максимальной скоростью. В точках касания непрерывных и пунктирных линий (точки a, b, c, d на рис. 4) выполняется условие общей касательной к этим линиям, что обеспечивает плавный переход одних линий в другие. В точках соприкосновения непрерывных линий (точки f, g на рис. 4), соответствующих остановке ротора, существуют общие касательные к ним, совпадающие с полярным радиусом.

Изменение полярного радиуса вдоль непрерывной базовой кривой описывается формулой:

$$\rho(\alpha) = \rho_{min} + \Delta\rho \times \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha}{\Delta\alpha}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\rho(\alpha)$  – полярный радиус;

$\rho_{min}$  – задаваемая величина минимального полярного радиуса;

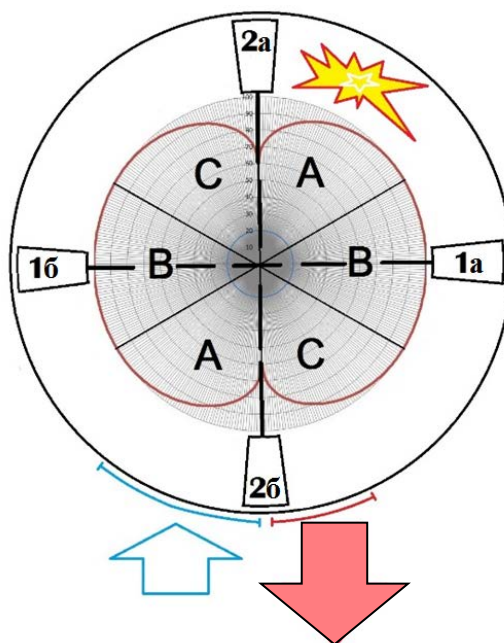
$\Delta\rho$  - задаваемый диапазон изменения величин полярного радиуса;

$\alpha = 0 \dots 360$  - полярный угол;

$\alpha_{max}$  – задаваемая величина полярного угла для полярного радиуса с максимальным значением;

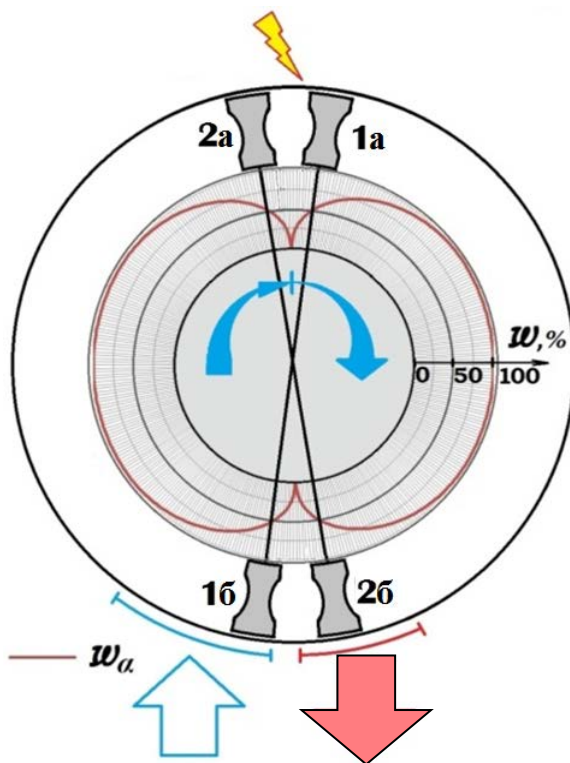
$\Delta\alpha$  – задаваемый диапазон изменения полярного угла, при котором полярный радиус однократно изменяется в пределах между минимальным и максимальным значением.

На рисунке 5 показано положение лопастей роторов, совмещенное с изображением базовой кривой. Лопасть 2а и 2б неподвижны, а лопасти 1а и 1б движутся с максимальными угловыми скоростями. Каждая пара соседних лопастей образует камеру, в которой последовательно реализуются процессы четырехтактного ДВС: впуск, сжатие, расширение, выпуск.



**Рис. 5.** Схема синхронизации на фоне базовой замкнутой кривой. А-А, В-В, С-С осесимметричные участки базовой кривой

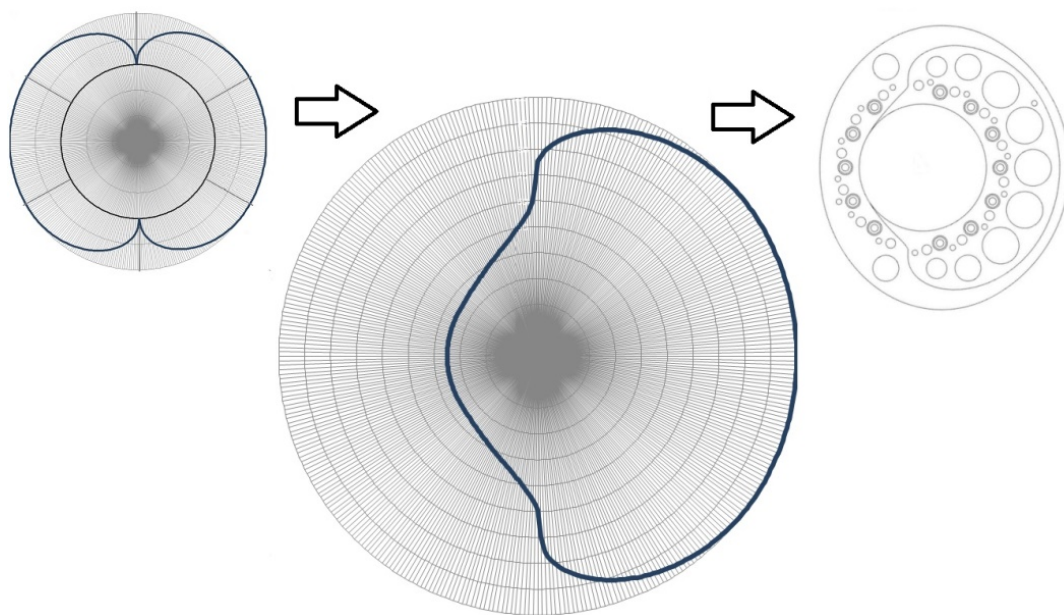
На рисунке 6 показано положение роторов, при котором их скорости одинаковы и составляют половину от максимального значения. При этом достигается минимальное расстояние между лопастями. Этот момент в РЛД соответствует моменту нахождения поршня в «верхней мертвой точке» (ВМТ) в поршневом двигателе с кривошипно-шатунным механизмом. В РЛД в момент, соответствующий ВМТ, скорость вращения роторов равна скорости вращения суммирующего вала.



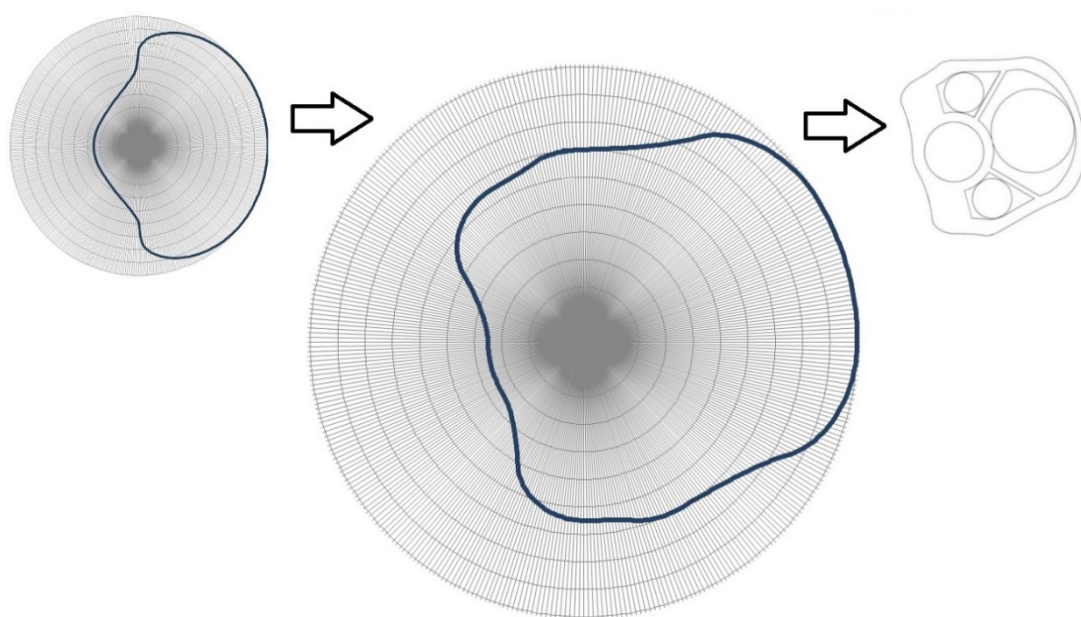
## Профилирование кулачков

Профилирование кулачков было выполнено графоаналитическим методом. Профиль кулачка с внутренней рабочей поверхностью (рис. 7) представляет собой внешнюю эквидистанту от замкнутой линии, полученной преобразованием базовой замкнутой кривой.

Профиль кулачка с внешней рабочей поверхностью представляет собой внутреннюю эквидистанту от линии, полученной моделированием замкнутой кривой, обеспечивающей задание требуемого алгоритма взаимосвязанного изменения угловых скоростей вращения роторов, контролируемых профилем кулачков с внутренней рабочей поверхностью (рис. 8).



**Рис. 7.** Моделирование профиля кулачков с внутренней рабочей поверхностью

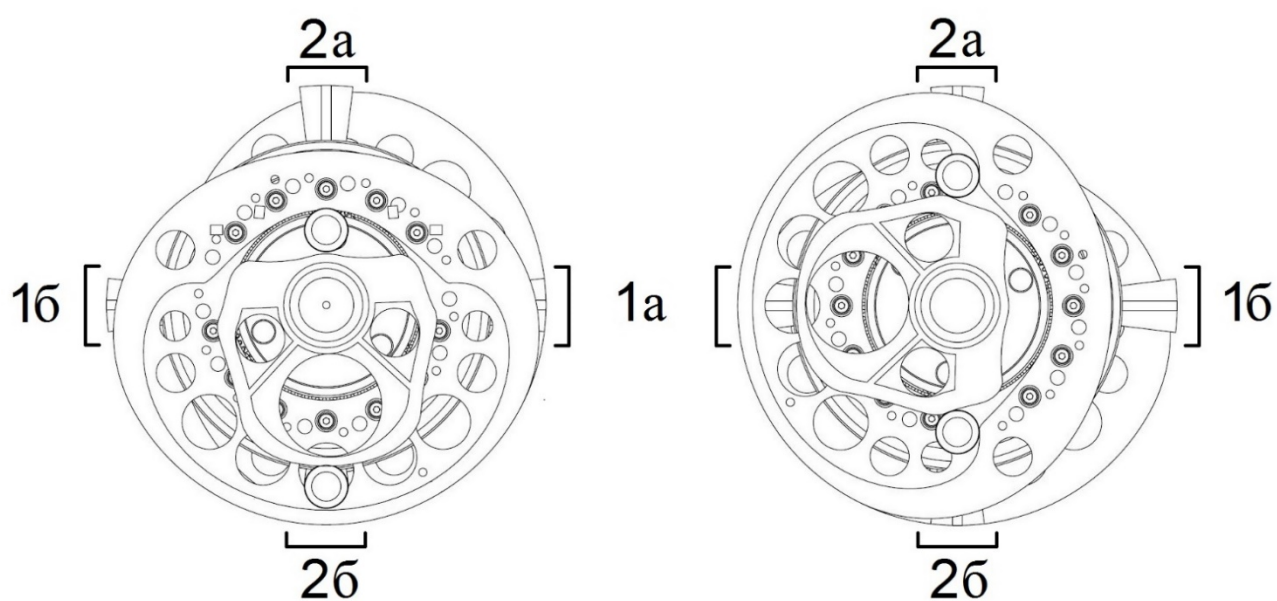


**Рис. 8.** Моделирование профиля кулачков с наружной рабочей поверхностью

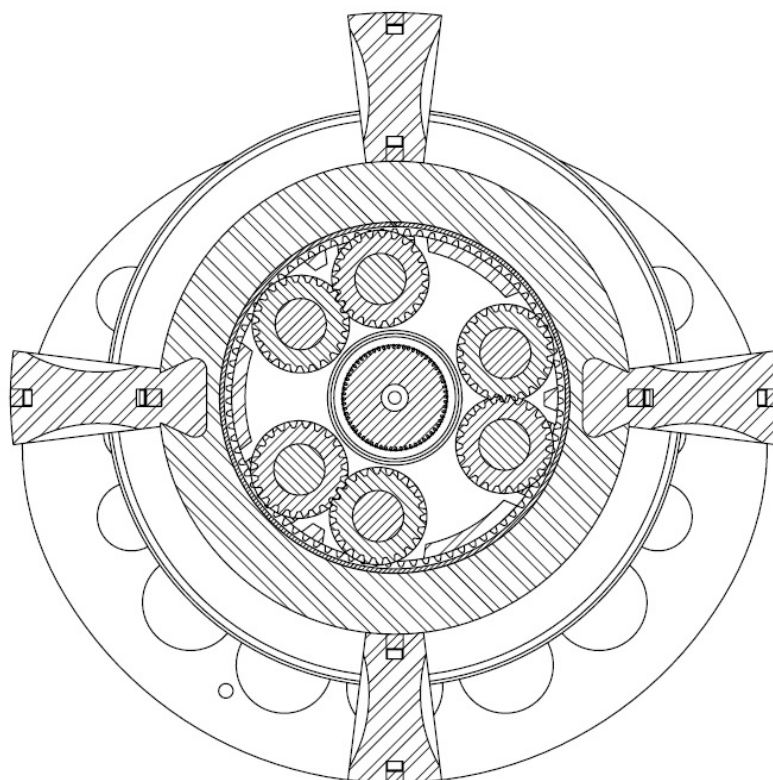
Подробная последовательность моделирования зависимых элементов роликово-кулачкового механизма изложена в описании изобретения к патенту RU 2673318 [4].

На рисунке 9 представлен механизм синхронизации роторов в сборе.

Синтезированный роликово-кулачковый механизм позволяет синхронизировать вращение роторов, с которых крутящий момент через симметричный дифференциальный планетарный редуктор передается суммирующему выходному валу. Редуктор обеспечивает вращение одного из роторов при блокировке другого. При этом угловая скорость вращения ротора в два раза больше, чем скорость вращения суммирующего вала. На режимах разгона-торможения роторов редуктор также обеспечивает симметрию приращения-убывания их скоростей. Разрез механизма синхронизации по редуктору показан на рисунке 10.



**Рис. 9.** Вид кулачков с двух сторон механизма синхронизации. 1а, 1б, 2а, 2б – лопасти роторов двигателя



**Рис. 10.** Разрез механизма синхронизации по редуктору

## Оценка коэффициента трансформации

Дифференциально-кулачковый механизм преобразует неравномерное вращение роторов в равномерное вращение суммирующего вала. При этом симметричный дифференциальный планетарный редуктор обеспечивает передачу крутящего момента с роторов на вал с коэффициентами передачи  $K_{п1}$  и  $K_{п2}$ , изменяющимися в пределах от 0 до 2.

Таким образом, крутящие моменты от роторов суммируются на выходном валу двигателя. На лопасти, образующие рабочие камеры (рис. 5), действует одинаковое давление газов. Крутящие моменты на этих роторах имеют разное направление.

Поскольку изменение крутящих моментов, передаваемых с роторов на вал, пропорционально изменению  $K_{п}$ , то и крутящий момент  $M$  на суммирующем валу будет меняться пропорционально разности текущих значений коэффициентов передачи  $K_{п1}$  и  $K_{п2}$ :

$$M \sim (K_{п1} - K_{п2}) . \quad (3)$$

Таким образом, крутящий момент, генерированный на условном плече ( $L = 1$  у.е.) от воздействия на «ведущую» лопасть (площадью  $S = 1$  у.е.) условного давления ( $P = 1$  у.е.), за вычетом крутящего момента, создаваемого на противопоставленной лопасти, вызванного тем же давлением, будет создавать на суммирующем валу мгновенный крутящий момент  $M$ :

$$M = (K_{п1} - K_{п2}) \times S \times P \times L \quad (4)$$

где  $M$  – мгновенный крутящий момент на суммирующем валу двигателя;

$K_{п1}$  – текущее значение коэффициента передачи крутящего момента от 1-го ротора на суммирующий вал;

$K_{п2}$  – текущее значение коэффициента передачи крутящего момента от 2-го ротора на суммирующий вал;

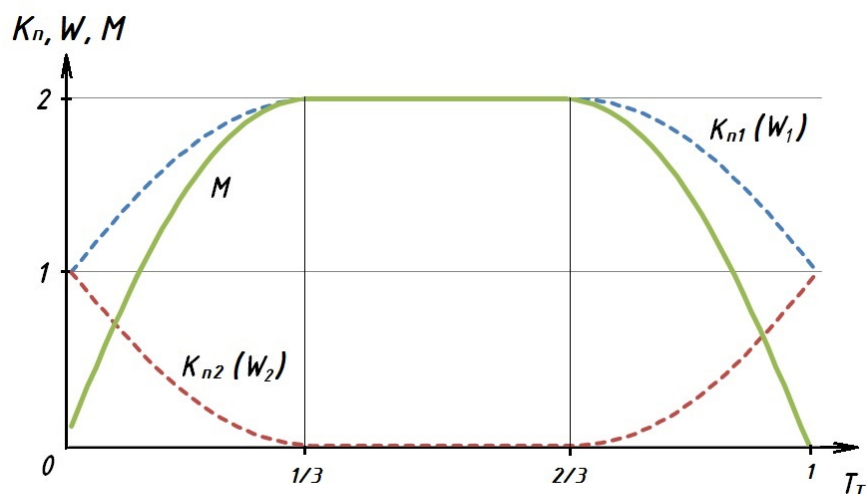
$S$  – площадь лопасти;

$P$  – давление;

$L$  – плечо, на котором вращается центр лопасти.

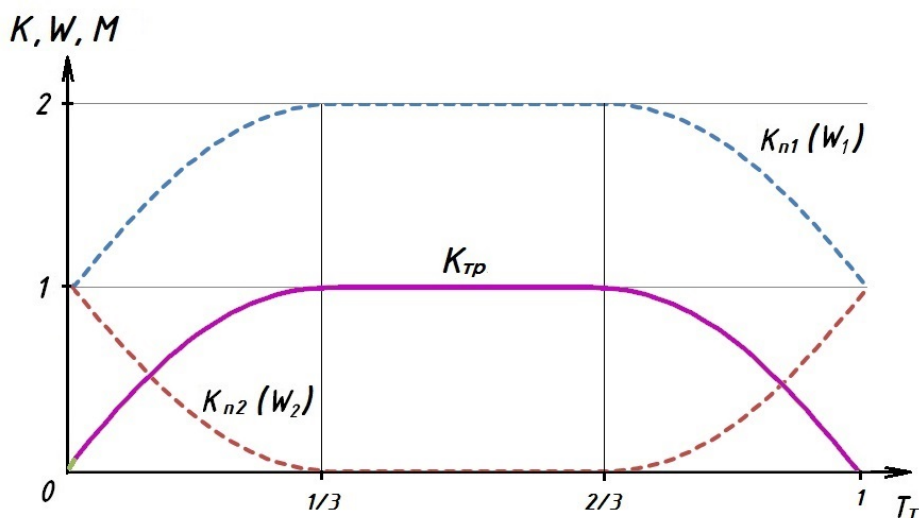
Учитывая диапазон и последовательность изменения значений  $K_{п1}$  и  $K_{п2}$ , величина момента  $M$  на суммирующем валу будет изменяться в пределах в пределах  $0 \div 2$  у.е.

Графики изменения коэффициентов преобразования, эквивалентных значениям приведенных к скорости вала скоростей вращения роторов, и крутящего момента (в условных единицах), сообщаемого выходному валу роторами в течение одного такта, показаны на рисунке 11.



**Рис. 11.** График изменения крутящего момента  $M$ , передаваемого роторами на суммирующий вал  
РЛД за один такт

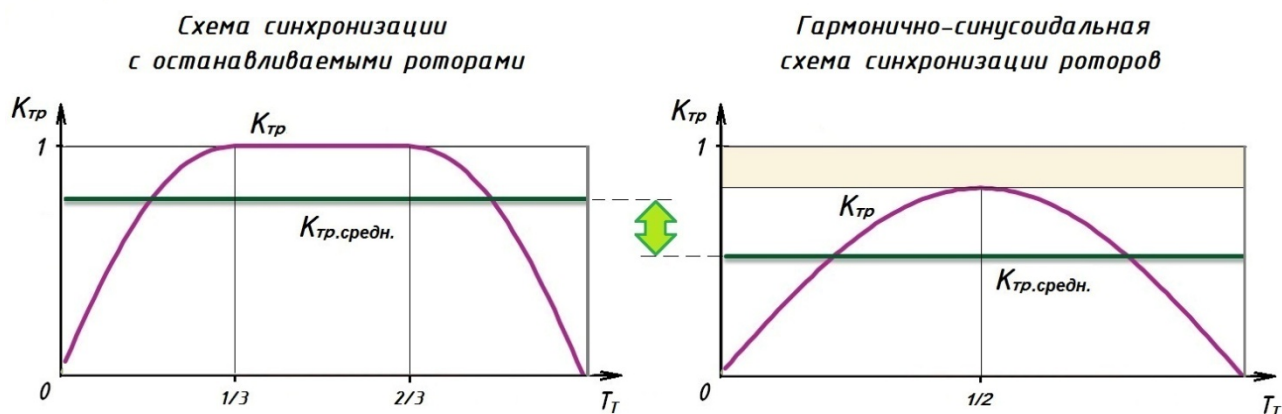
Как показано выше, коэффициент трансформации крутящего момента определяется по формуле (1). Для синтезированного механизма преобразования график изменения  $K_{тр}$  в течение одного такта показан на рисунке 12.



**Рис. 12.** График изменения коэффициента трансформации  $K_{тр}$

На графике отчетливо прослеживается зависимость значений коэффициента трансформации (опосредовано через коэффициенты преобразования) от динамики изменения угловых скоростей вращения роторов, а, следовательно, и от динамики изменения рабочего объема между лопастями. Данная особенность может стать ключом к взаимосвязи между коэффициентом трансформации и степенью адиабатизации рабочих процессов в ДВС, влияющей на его тепловой КПД.

В сравнении с преобразователями, создаваемыми на базе гармонично-синусоидальной схемы синхронизации роторов [1], синтезированный дифференциально-кулачковый преобразователь с останавливаемыми роторами будет иметь заметно большее значение среднего коэффициента трансформации  $K_{тр.средн.}$  (рис. 13).



**Рис. 13.** Сравнение коэффициентов трансформации

Соотношение средних значений коэффициентов трансформации разных преобразователей характеризует соотношение эффективности механического преобразования сил давления газов, действующих на лопасти, в крутящий момент на валу двигателя при постоянном значении этих сил давления.

При работе преобразователей в составе РЛД дополнительный эффект должен возникать тождественно степени смещения более высоких значений (и полки максимума) коэффициента трансформации в зону действия максимальных значений давления газов

### **Заключение**

Реализованный подход к синтезированию дифференциально-кулачкового механизма позволил определить профиль кулачков, который обеспечивает плавную синхронизацию вращения роторов и периодическую их остановку на расчетный период времени с фиксацией в требуемом положении. При этом достигается высокое среднее значение за такт коэффициента трансформации крутящего момента.

Полученный результат и его сравнительная оценка доказывают возможность эффективного преобразования неравномерного вращательного движения роторов в равномерное вращение выходного вала РЛД.

Вместе с тем, для обоснования возможности создания работоспособного РЛД с высокими удельными показателями требуется исследование следующих проблемных вопросов.

В первую очередь необходимо изучить особенности динамики изменения рабочих объемов двигателя, влияние этих особенностей на термодинамические процессы в РЛД и на термический КПД двигателя.

Необходимо определить нагрузки на детали дифференциально-кулачкового механизма с учетом взаимной компенсации барических и инерционных сил.

Нуждаются также в оценке динамические свойства РЛД.

### **Список литературы**

1. Зайцев А.А. Обзор и анализ мировых разработок роторно-лопастных двигателей. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация — 2023;(3): 16 - 33 с.
2. Патент RU2225513. Роторно-лопастной двигатель внутреннего сгорания / Авторы: Аракелов А.Н., Аракелов Н.В./ Патентообладатель: ФГУП "Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина".
3. Патент US3381669. Rotary internal combustion engine / Автор и патентообладатель: T.Tschudi.
4. Патент RU2673318. Механизм для преобразования движения / Авторы: Зайцев А.А., Головков А.И./ Патентообладатель: Зайцев А.А.

---

### **АВТОР**

**Зайцев Андрей Алексеевич**, [a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru), руководитель проекта РЛД ООО «АЗАРТ» (ОПН Сколково 1123493).

# Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal  
International Public Organization  
“Integration strategy”  
<http://maplants-journal.ru>*

//Machines and Plants:Design and Exploiting.  
2023. № 4. pp. 30 – 28.

DOI:

Received: 08.10.2023

Accepted for publication: 17.10.2023

© International Public Organization “Integration  
strategy”

## Synthesis of a mechanism for converting uneven rotational motion of rotors into uniform rotation of the output shaft of a rotary-vane engine

Andrey A. Zaytsev

[a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru) AZART LLC (ID Skolkovo  
1123493), Russian Federation

The results of synthesizing a mechanism that converts the uneven rotational motion of the rotors into a uniform rotation of the output shaft of a rotary- vane engine (RVE) are presented. The transformation is carried out by a roller-cam mechanism and an associated symmetric differential planetary gearbox. A distinctive feature of the mechanism is the original cam profile, which provides the necessary synchronization of the rotation of the rotors with periodic stops, which allows you to create the best conditions for the transmission of torque from the rotors to the output shaft of the engine. A visual comparative assessment of the effectiveness of mechanisms implementing a conversion scheme with stopped rotors and a harmonic-sinusoidal scheme is given. The coefficient of torque transformation is justified by the evaluation criterion.

The directions of further research in the field of creating RVE with high specific indicators are shown.

**Keywords:** rotary-vane engine, design analysis, conversion mechanism, rotor synchronization, torque transformation coefficient.

### References

1. Zaytsev A.A. Overview and analysis of world developments of rotary-vane engine. Machines and Plants: Design and Exploiting. 2023;(3):16-33.
2. Patent RU2225513. Rotary-blade internal combustion engine / Authors: Arakelov A.N., Arakelov N.V. / Patent holder: FSUE "Siberian Scientific Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin".
3. Patent US3381669. Rotary internal combustion engine / Author and patent holder: T.Tschudi.
4. Patent RU2673318. Mechanism for the transformation of motion / Authors: Zaitsev A.A., Golovkov A.I. / Patent holder: Zaitsev A.A.

### AUTHOR

**Andrey A. Zaytsev**, [a.zaitsev@list.ru](mailto:a.zaitsev@list.ru), project manager of the RVE of “AZART” LLC (ID Skolkovo 1123493).