

Анализ эффективности различных схем преобразования энергии газов в крутящий момент

I.	Конструкции преобразователей РЛД	2
II.	Расчет характеристик перспективного РЛД на базе методики расчета для поршневого двигателя с КШМ	3
	1. Расчет характеристик поршневого двигателя	4
	2. Расчет характеристик РЛД	7
	3. Результат сравнительного расчета	12
III.	Анализ особенностей синусоидальных схем синхронизации	13
	1. Расчет эффективности преобразователя конструкции Псковского ГПИ с гармонично-синусоидальной схемой синхронизации	14
	2. Расчет эффективности преобразователя с полно-синусоидальной схемой синхронизации	17
	3. Анализ эффективности синусоидальных схем синхронизации	19
IV.	Выводы	22

I. Конструкции преобразователей РЛД

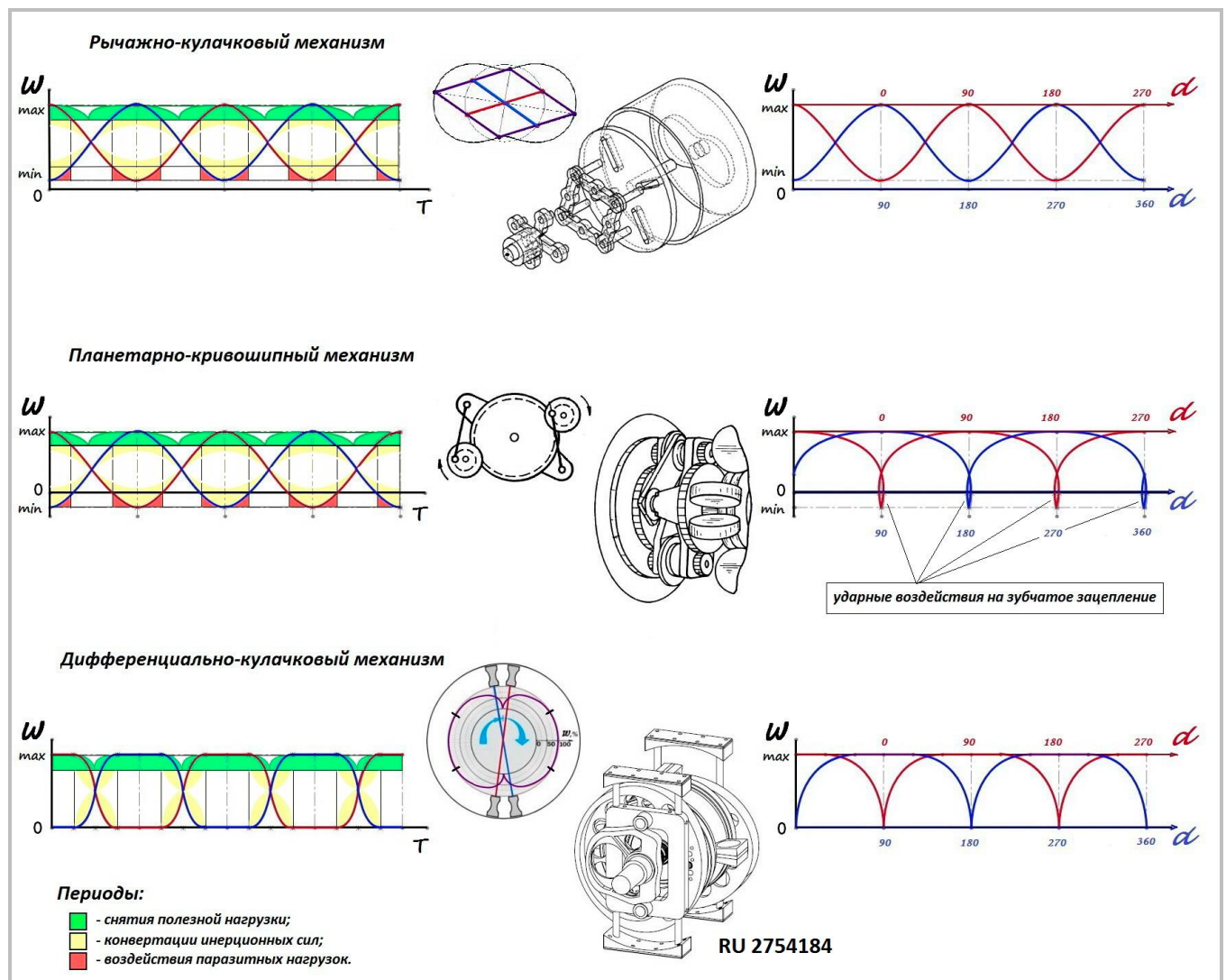
В ходе проводимых исследований по проекту роторно-лопастного двигателя (РЛД) большое значение уделялось анализу множества предлагавшихся ранее вариантов конструкций двигателей такого типа. Информация о многообразии применявшихся схем преобразования неравномерного вращения роторов в равномерное вращение выходного вала представлена по адресу <https://www.az69art.ru/rve-history>. На основе анализа проведена их систематизация.

Основную массу конструкций, за редким исключением, можно разделить на три группы:

1. Группа гармонично-синусоидальных схем.
2. Группа экстремально-синусоидальных схем.
3. Группа схем синхронизации с останавливаемыми роторами.

К третьей группе относится новая конструкция с дифференциально-кулачковым механизмом.

На следующем рисунке в упрощенном параметрическом виде отображены принципиальные особенности схем синхронизации на примере характерных представителей классифицированных групп.



В верхнем ряду отображены 2 графика, относящиеся к группе гармонично-синусоидальных схем синхронизации, типичным представителем которых, например, является рычажно-кулачковый механизм конструкции Псковского ГПИ.

В среднем ряду отображены 2 графика, относящиеся к группе экстремально-синусоидальных схем, типичным представителем которых является планетарно-кривошипный механизм, а одним из примеров его применения был синхронизатор РЛД Ё-мобиля.

В нижнем ряду – графики, применимые к конструкции РЛД (пат. RU 2754184) с останавливаемыми роторами.

В результате проведенных исследований установлено, что гармонично-синусоидальные схемы преобразователей, не позволяют достичь приемлемых характеристик эффективности преобразования энергии, а экстремально-синусоидальные схемы несостоятельны, так как избыточные вибрационные нагрузки не позволяют создать надежную конструкцию.

Что касается дифференциально-кулачкового механизма с останавливаемыми роторами, то, во-первых, такой принцип синхронизации позволяет расчетным методом оптимально согласовывать величины сил инерции роторов с величиной и динамикой изменения давления газов в межлопастном пространстве, а во-вторых, такой алгоритм и динамика работы механизма синхронизации роторов позволят достичь более эффективного преобразования энергии расширяющихся газов в крутящий момент и добиться значительно лучших характеристик двигателя.

II. Расчет характеристик перспективного РЛД на базе методики расчета для поршневого двигателя с КШМ

Данный расчет производится для оценки потенциальных показателей эффективности РЛД, соответствующего описанию к Патенту RU 2754184.

В связи с тем, что нет оснований предполагать наличие принципиальных и значимых отличий в физических процессах сгорания топлива в условиях тороида от таковых в условиях цилиндра поршневого двигателя, кроме указанных и учтенных далее по тексту, для проведения сравнительного анализа принята методика, применяющаяся для расчета индикаторных характеристик поршневого ДВС.

После проведения термодинамических и прочих расчетов финальной конструкции РЛД и после проведения испытаний опытного образца, полученные результаты будут учтены для корреляции методики расчета, используемой на данной стадии.

Для дальнейшего сравнительного анализа получаемых результатов проводится параллельный расчет РЛД и поршневого двигателя (ПД) с КШМ. Конструктивные особенности ПД с КШМ, необходимые к учету для расчета индикаторных характеристик, принимаем полностью соответствующими параметрам РЛД, принятым в эскизном проекте.

Исходные данные

Тип двигателя	Поршневой с КШМ	РЛД
Тактность	4-тактный	
Вид топлива	бензин	
Обороты макс.мощности	5000	
Рабочий объем одной секции (цилиндра)	1678,62 см ³	
Количество секций (цилиндров)	8	1

1. Расчет характеристик поршневого двигателя

Для расчета воспользуемся следующей формулой:

$$N_i = \frac{i \cdot V_h \cdot p_i \cdot n}{30\tau} \text{ кВт,}$$

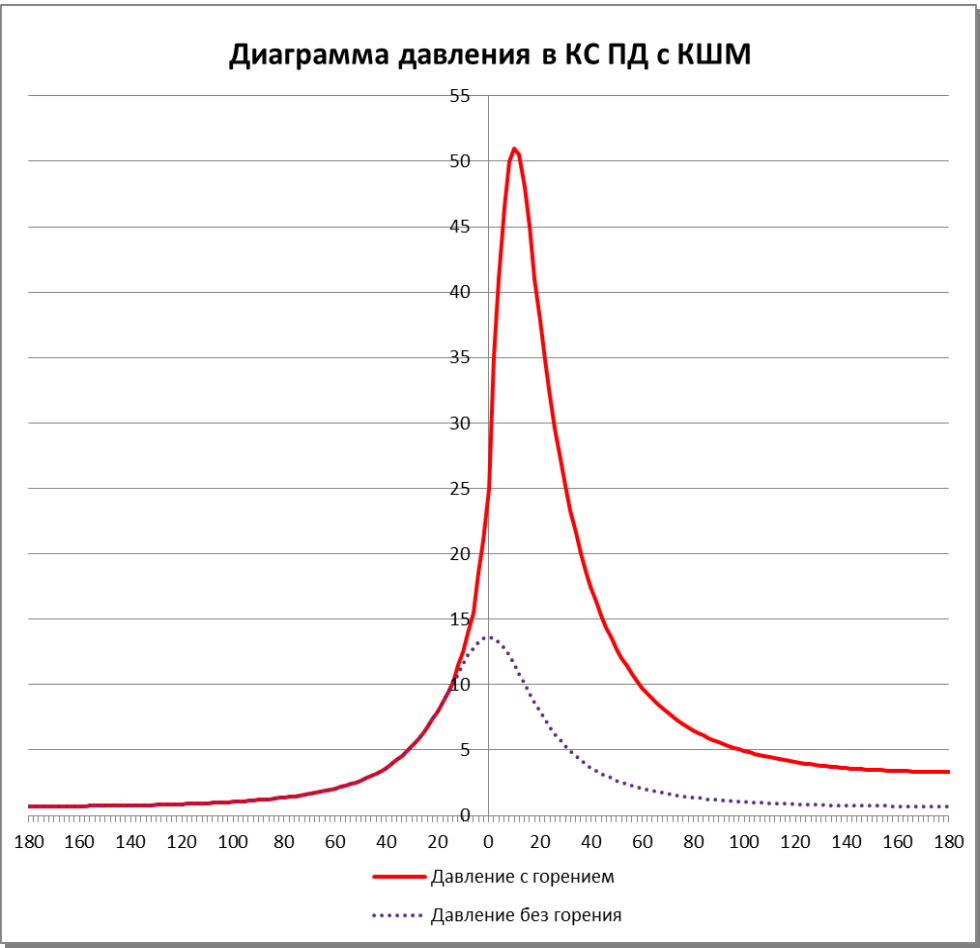
где $i \cdot V_h$ – литраж двигателя, дм³ (литр); i – число цилиндров; p_i – среднее индикаторное давление, МПа; n – число оборотов, об/мин; τ – коэффициент тактности; $\tau = 4$ – для четырехтактных, $\tau = 2$ – для двухтактных двигателей.

Чтобы использовать данную формулу, требуется определить среднее индикаторное давление, которое мы сможем получить, определив индикаторную работу двигателя, для чего построим индикаторную диаграмму.

В связи с тем, что для нашего сравнительного анализа не важны абсолютные величины индикаторных характеристик, а важно их принципиальное соотношение для выбранных типов двигателей, сделаем допущение, что условия сгорания топлива в цилиндре ПД и в тороидальной камере РЛД примерно одинаковы и различаются, в основном, в соответствии с разностью динамики изменения объема камеры сгорания по углу поворота вала двигателя, что отражается на величине максимального давления.

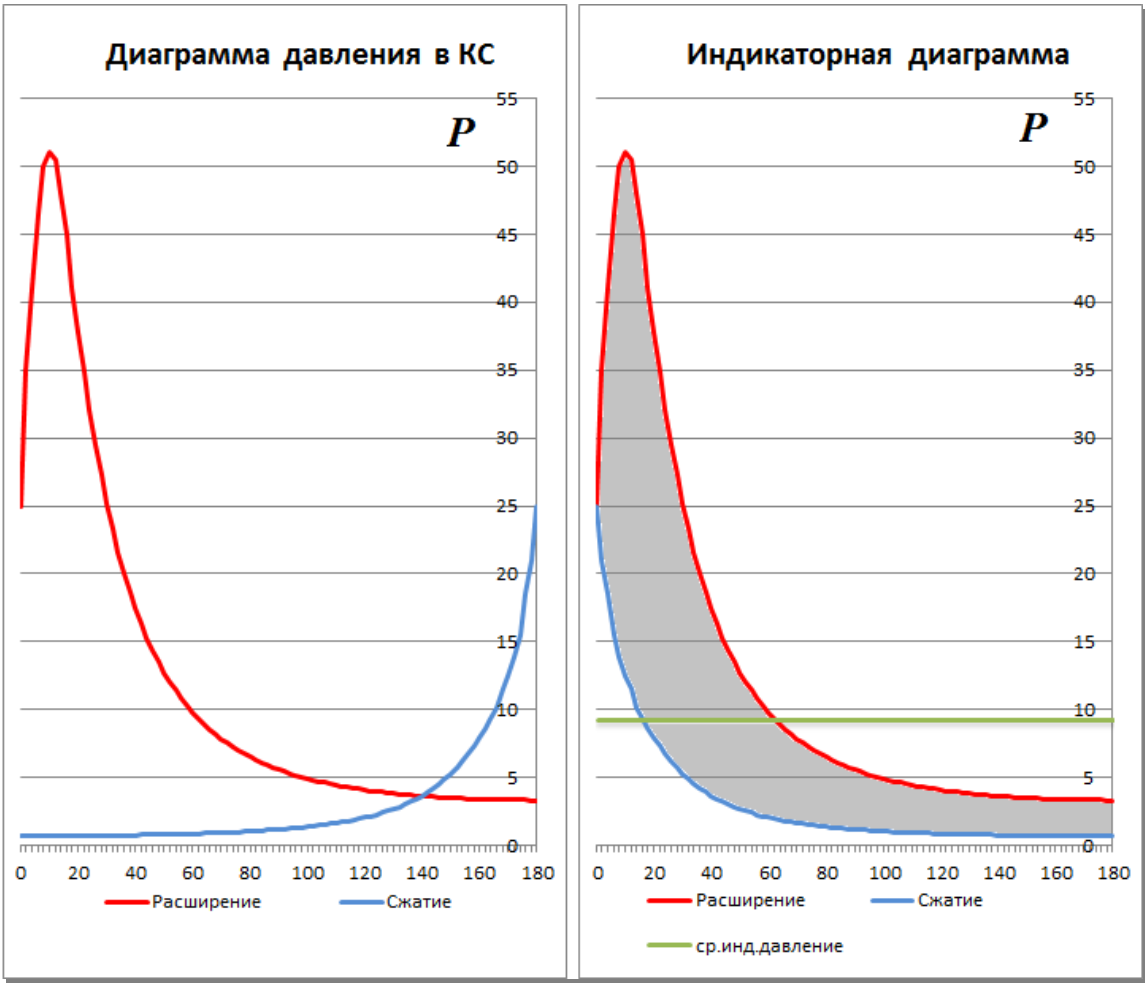
Далее будет представлен график, отображающий разницу этих динамик, а для начала смоделируем график изменения давления в камере сгорания ПД в зависимости от угла поворота вала, который также в дальнейшем станет основой моделирования изменения величины давления в камерах РЛД.

Примем следующую условную модель изменения давления в цилиндре ПД с высокой степенью сжатия.



Для упрощения сравнительных расчетов, падение давления при открытых клапанах не моделируем.

На основе этого графика строим индикаторную диаграмму.



Из массива данных индикаторной диаграммы определяем среднее индикаторное давление ($p_i = 9,31 \text{ кгс/см}^2$ или $0,913 \text{ МПа}$).

Воспользовавшись представленной выше формулой, получаем индикаторную мощность условного ПД $N_i = 511 \text{ кВт}$.

Если принять для ПД механический КПД равным $0,8$ ед., получаем эффективную мощность $N_e = 409 \text{ кВт}$.

Используя полученные результаты, можно оценить такие ориентировочные параметры условного ПД, как его КПД и удельный расход топлива.

Для этого воспользуемся следующими зависимостями.

Индикаторный расход топлива и индикаторный КПД. Удельный индикаторный расход топлива представляет отношение часового расхода топлива к индикаторной мощности:

в $\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$

$$g_i = \frac{G_T}{N_i},$$

или в $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$

$$g_i = \frac{G_T}{N_i} \cdot 10^3.$$

В практических расчетах чаще всего низшую удельную теплоту сгорания H_u задают в МДж, а g_i в $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, тогда

$$\eta_i = \frac{3600 \cdot 1000}{H_u \cdot 10^6 g_i \cdot 10^{-3}} = \frac{3600}{H_u g_i}; \quad g_i = \frac{3600}{H_u \eta_i}.$$

Удельная теплота сгорания бензина H_u принятая к расчету составляет 44000 кДж/кг .

Из условной модели изменения давления в цилиндре ПД можно определить, что при рабочем объеме одного цилиндра равном $1,68 \text{ л}$, с учетом степени разряжения на впуске, сжатию подвергается $1,27 \text{ л}$ ($1,56 \text{ гр.}$) воздуха и для обеспечения стехиометрического состава смеси потребуется подать $0,106 \text{ гр.}$ бензина.

Таким образом, можно определить, что индикаторный КПД данного условного ПД окажется равным **0,39**.

При условно принятом механическом КПД равным $0,8$ ед. получаем эффективный КПД двигателя равным **0,32**.

Удельный расход топлива, таким образом, составит **259 г/кВт*ч**.

2. Расчет характеристик РЛД

Для расчета воспользуемся той же формулой:

$$N_i = \frac{i \cdot V_h \cdot p_i \cdot n}{30\tau} \text{ кВт,}$$

где $i \cdot V_h$ – литраж двигателя, дм^3 (литр); i – число цилиндров; p_i – среднее индикаторное давление, МПа; n – число оборотов, об/мин; τ – коэффициент тактности; $\tau = 4$ – для четырехтактных, $\tau = 2$ – для двухтактных двигателей.

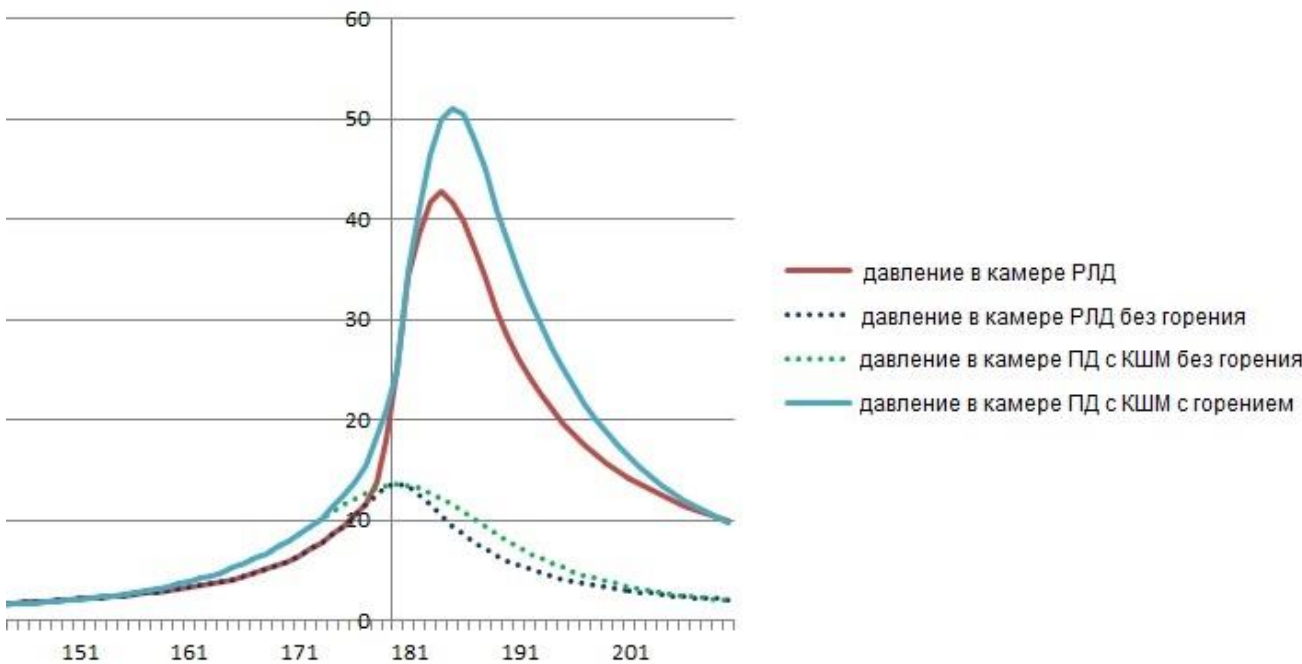
Определим коэффициент тактности двигателя, построив зависимость.

Двигатель	4х тактн	2х тактн	РЛД
РЦ за 2 об вала	1	2	8
t	4	2	0,5

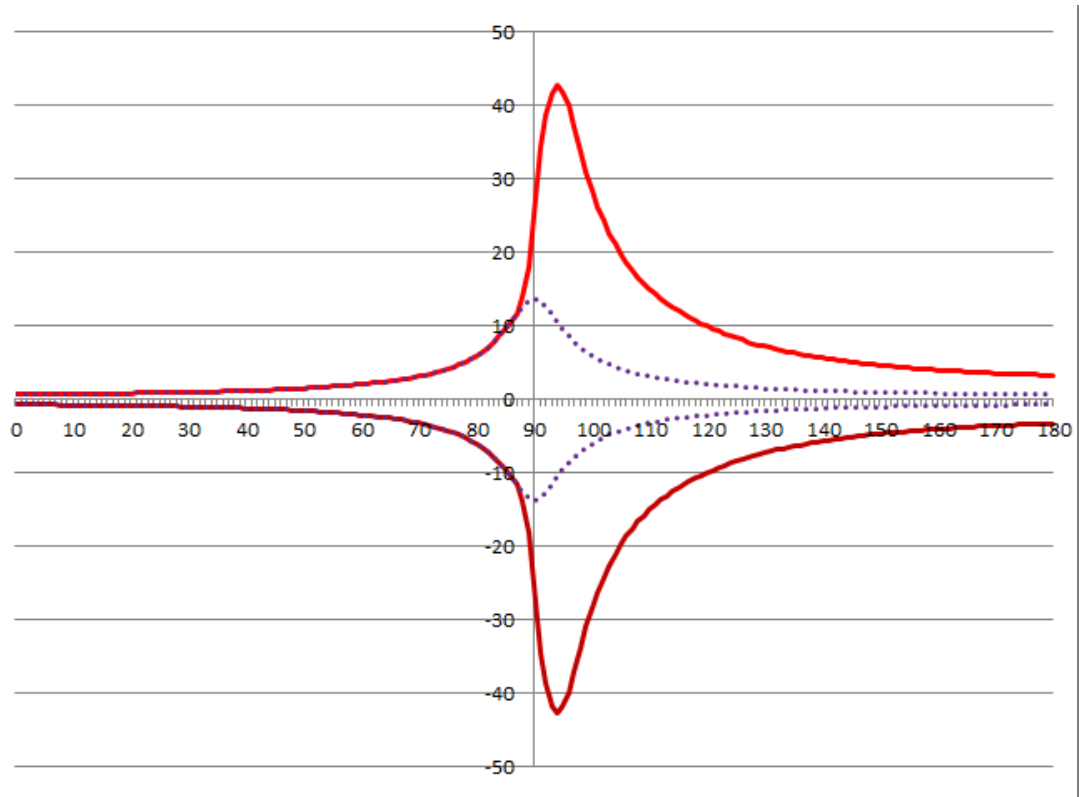
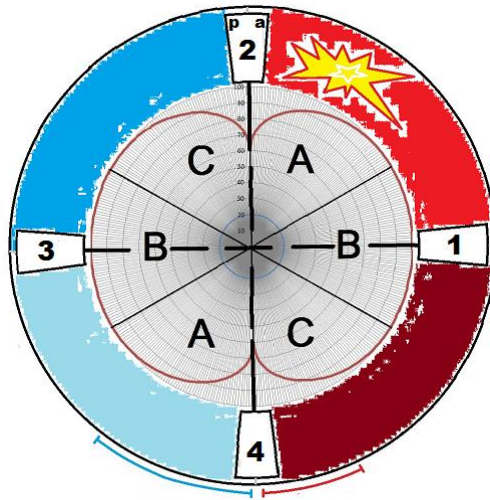
Принимаем коэффициент равным значению **0,5**.

Далее смоделируем график изменения давления в камере сгорания РЛД (с аналогичным литражом) в зависимости от угла поворота вала.

Модель строим в соответствии с разностью динамики изменения объема и, соответственно, давления в камере сгорания РЛД в соотношении с таковой динамикой в ПД.



На основе этого графика строим диаграмму для РЛД с учетом того, что давление в камере тороида воздействует одновременно на две лопасти и в смежных камерах происходят смежные такты двигателя.



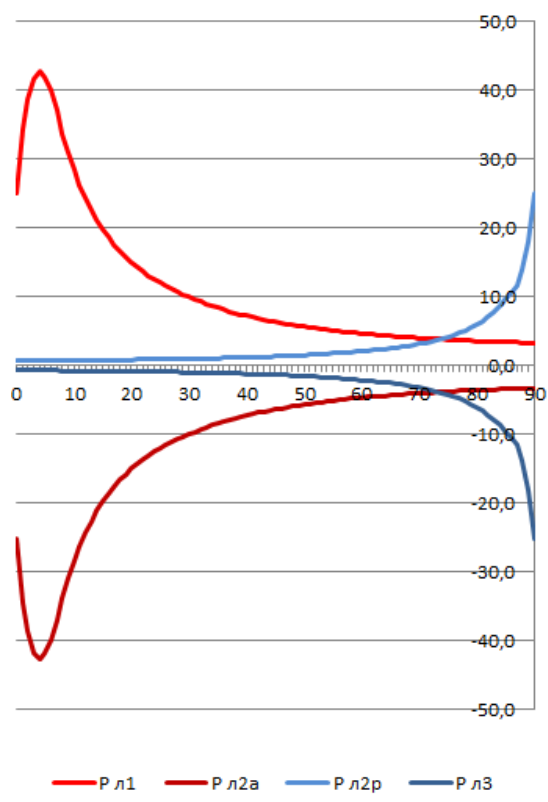
Строим индикаторную диаграмму, учитывая, что такт сжатия и рабочий такт происходят одновременно в соседних камерах за 90 градусов поворота вала двигателя.

Полезная нагрузка снимается с лопасти Л1.

Со стороны аверса лопасти Л2 воспринимается сила давления, действующая в оппозитном направлении.

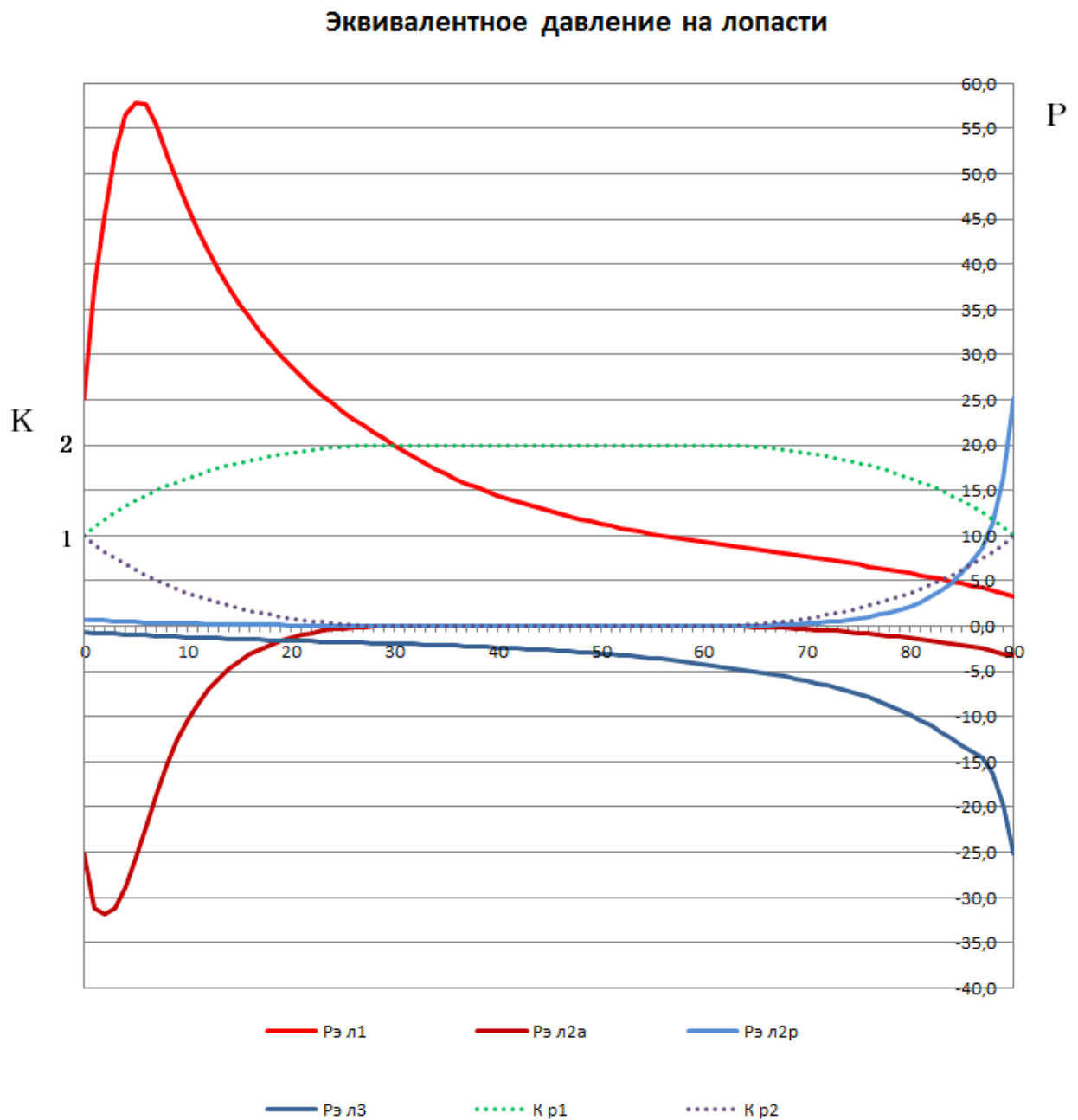
Со стороны реверса лопасти Л2 воспринимается сила давления топливоздушнoй смеси, сжимаемой лопастью Л3.

1/4 оборота вала



В связи с тем, что воздействующая на лопасти сила давления газов создает крутящий момент на валу двигателя посредством симметричного планетарного дифференциального редуктора с переменным передаточным отношением, для построения индикаторной диаграммы потребуется определить величины эквивалентного давления на лопасти.

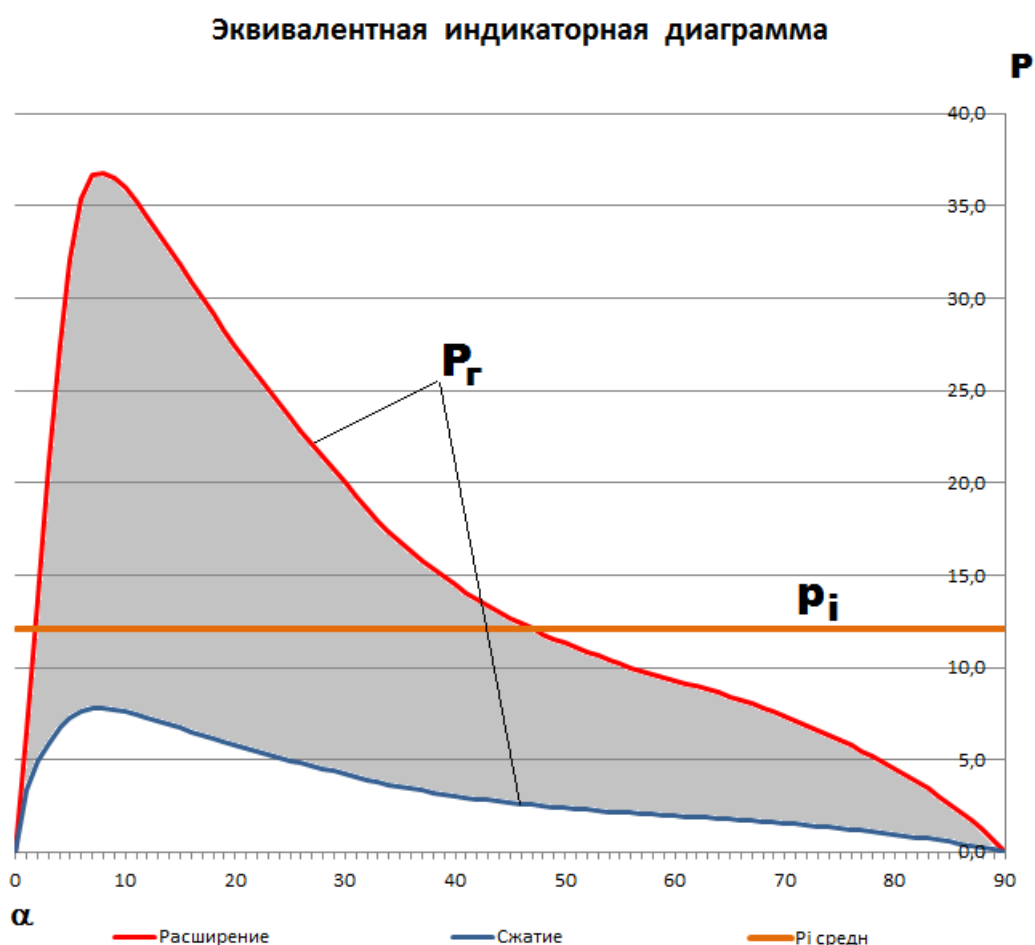
Передача крутящего момента с роторов на вал происходит с передаточными отношениями, коэффициент **К** которых изменяется в пределах **0 ÷ 1 ÷ 2** ед. пропорционально изменению скорости роторов в пределах **0 ÷ 100% ÷ 200%** от скорости вращения выходного вала.



Сложив величины давлений в тактах расширения и сжатия, получаем суммарную диаграмму.



В итоге получаем эквивалентную индикаторную диаграмму и определяем среднее эквивалентное индикаторное давление ($p_i = 12,07 \text{ кгс/см}^2$ или 1,184 МПа).



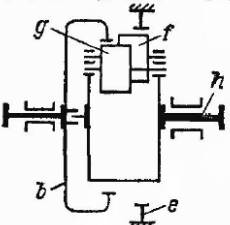
Воспользовавшись представленной выше формулой, получаем индикаторную мощность исследуемого РЛД $N_i = 662 \text{ кВт}$.

По аналогии с расчетами условного ПД и используя те же исходные данные, определим КПД и удельный расход топлива РЛД.

Индикаторный КПД исследуемого РЛД получился равным **0,51**.

Планетарные передачи. Справочник. Под ред. докторов техн. наук В. Н. Кудрявцева и Ю. Н. Кирдяшева. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977.

Продолжение табл. 1.1.

Вариант	Условное обозначение варианта	Схема	Ориентировочное рациональное передаточное отношение	Ориентировочный к.п.д.
9	D_{hb}^e		~ 2	0,99—0,96

Так как в односекционном РЛД потери на трение и другие паразитные нагрузки будут значительно ниже, чем в 8-цилиндровом ПД, а КПД симметричного дифференциального редуктора составит около 98%, принимаем для данной конструкции общий **механический КПД** равным **0,9 ед.** и получаем эффективную мощность **$N_e = 596$ кВт.**

Исходя из этого, получаем эффективный КПД РЛД равным **0,46**. Удельный расход топлива - **177,6 г/кВт*ч.**

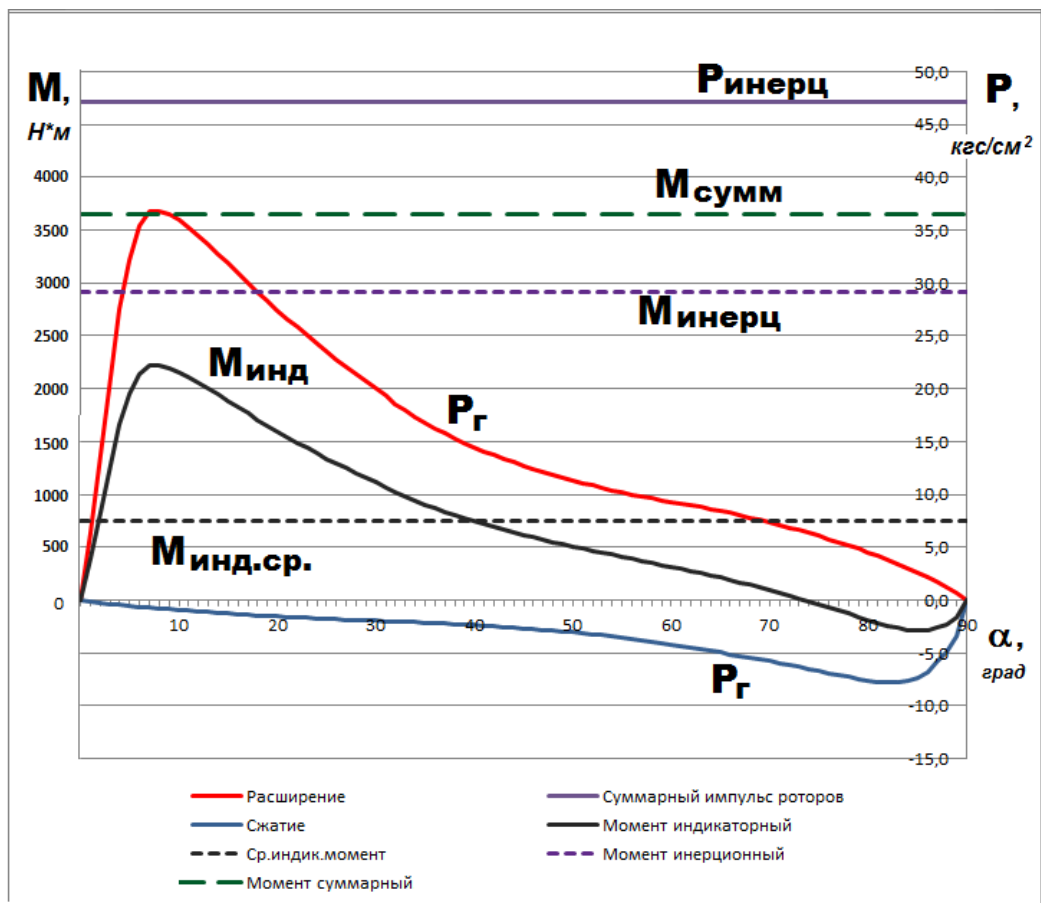
Стоит отметить, что по аналогии с расчетами мощностных показателей двигателей Ванкеля, у которых велика положительная составляющая инерционных сил ротора и эксцентрика, в расчеты РЛД также необходимо дополнительно включать инерционную составляющую.

В расчет инерционных масс взята их активная составляющая в виде основных элементов роторов с навесными элементами синхронизатора и лопастями. Один такой комплект имеет момент инерции **0,34 кг*м².**

Суммарная сила инерции активных инерционных масс **$P_{и}$** при 5000 об/мин в единицах измерения, приведенных к размерности индикаторной диаграммы, составляет **47,16 ед.** (фиолетовая линия на индикаторной диаграмме).

Принимая в расчет как индикаторные, так и инерционные силы, получаем суммарный момент РЛД при 5000 об/мин равным **3650 Н*м.**

Таким образом, на данном этапе можно сделать предварительный вывод о том, что концепция РЛД намного эффективнее концепции ПД с КШМ.



3. Результат сравнительного расчета

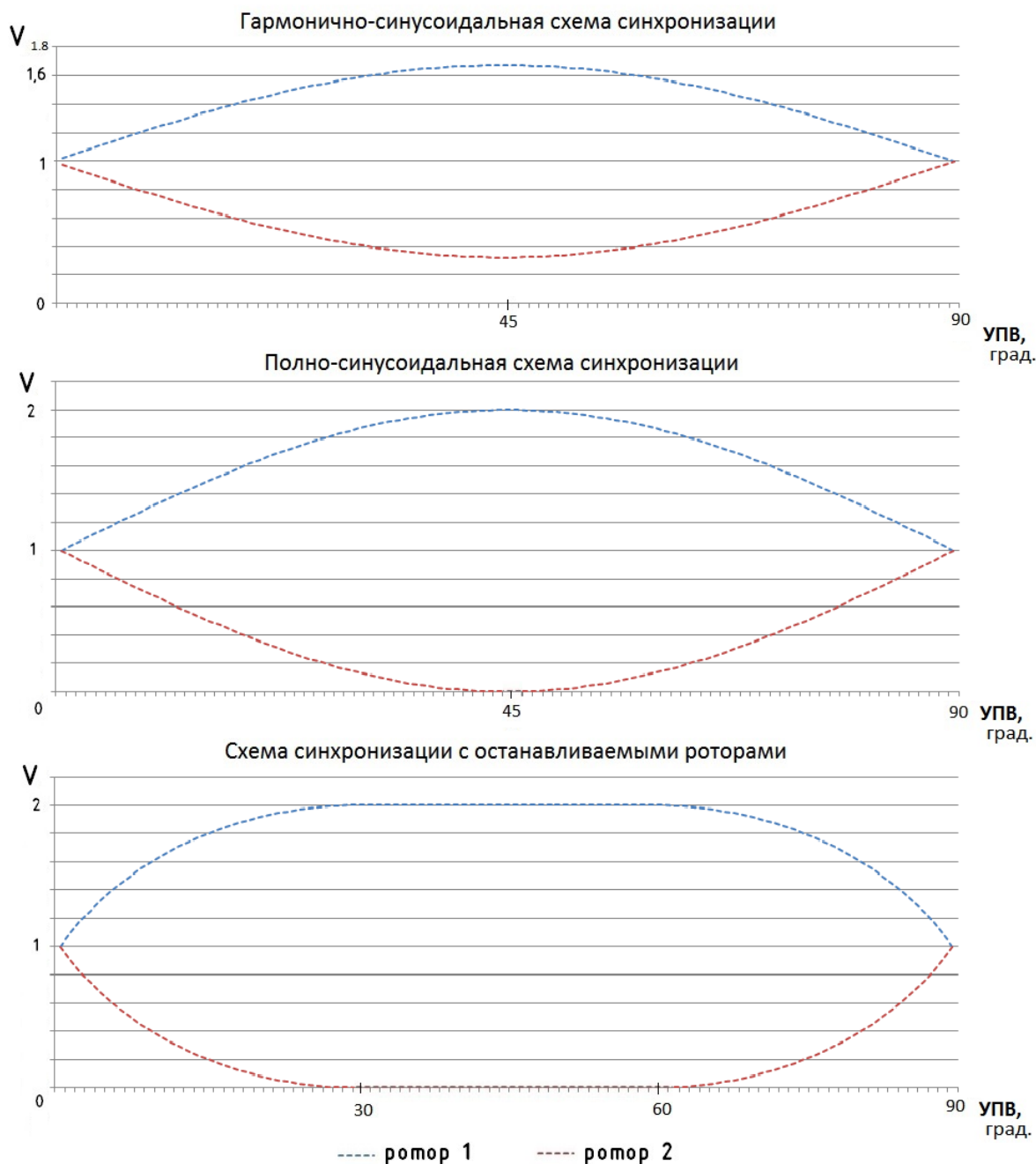
Показатель / двигатель	Поршневой с КШМ	РЛД
Тактность	4-тактный	
Вид топлива	бензин	
Обороты макс. мощности	5000	
Рабочий объем одной секции (цилиндра)	1678,62 см ³	
Количество секций (цилиндров)	8	1
среднее индикаторное давление, МПа	0,913	1,184
индикаторная мощность, кВт	511	662
эффективная мощность, кВт (л.с.)	409 (556)	596 (810)
индикаторный КПД	0,39	0,51
эффективный КПД	0,32	0,46
удельный расход топлива, г/кВт*ч (г/л.с.*ч)	259 (190)	177,6 (131)

III. Анализ особенностей синусоидальных схем синхронизации

Полученные в предыдущей главе результаты расчетов соответствуют поставленным в исследовании целям проекта. Однако, для выявления факторов, обуславливающих достижение получаемого эффекта, необходимо произвести дополнительные расчеты для других вариантов синусоидальных схем синхронизации.

Из перечня рассмотренных в первой главе вариантов есть смысл исключить из расчетов экстремально-синусоидальную схему синхронизации, так как в преобразователе РЛД, сконструированном по такой схеме, неизбежно при работе механизма будут возникать хлыстовые движения останавливающихся лопастей, что будет вызывать высокие ударные нагрузки на зубчатые передачи, что, следовательно, снизит степень их надежности до неприемлемого уровня. Это исключает смысл проведения расчетов эффективности для данной схемы. Вместо нее добавим в расчеты условную полно-синусоидальную схему синхронизации.

Графики скоростей роторов в зависимости угла поворота вала (УПВ) для рассматриваемых схем будут выглядеть следующим образом.



В качестве примера исполнения гармонично-синусоидальной схемы синхронизации рассматриваем преобразователь вращения роторов РЛД (RU 2651106 С2) конструкции Псковского ГПИ.

Передача крутящего момента с роторов на вал с таким преобразователем происходит с передаточными отношениями, коэффициент **К** которых изменяется в пределах **0,33 ÷ 1 ÷ 1,67** ед. пропорционально изменению скорости роторов в пределах **33% ÷ 167%** от скорости вращения выходного вала.

В случае применения двух других схем синхронизации передача крутящего момента с роторов на вал происходит с передаточными отношениями, коэффициент **К** которых изменяется в пределах **0 ÷ 1 ÷ 2** ед. пропорционально изменению скорости роторов в пределах **0 ÷ 100% ÷ 200%** от скорости вращения выходного вала.

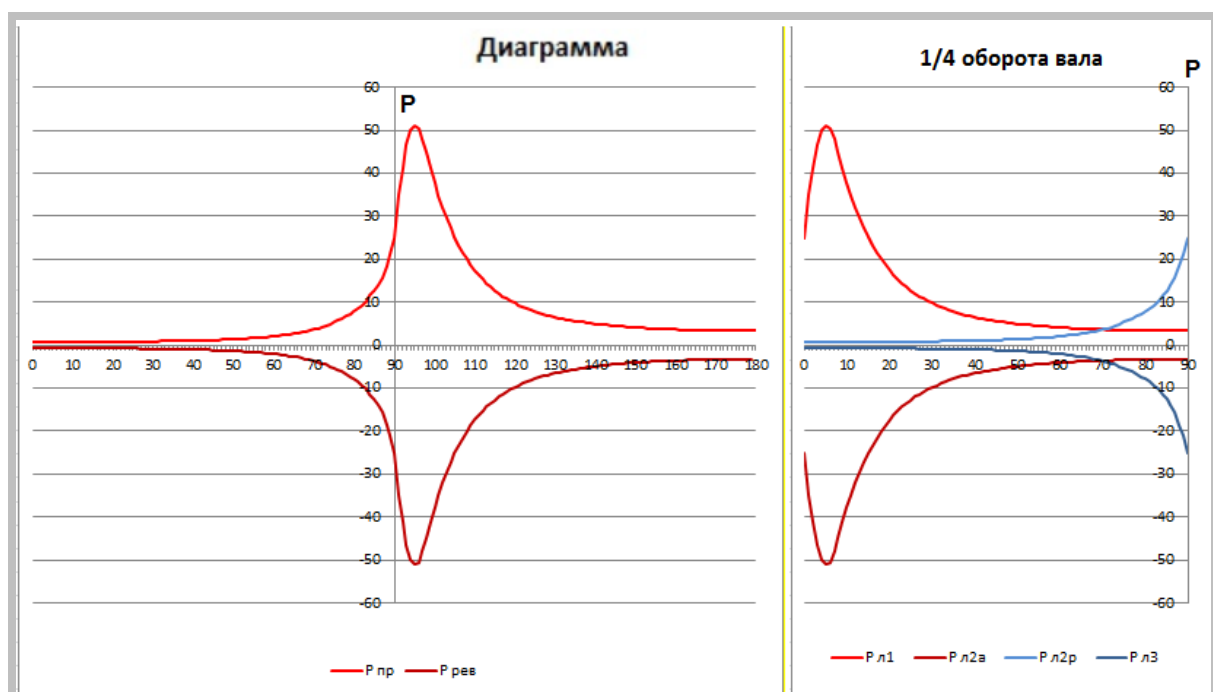
Для схемы синхронизации с останавливаемыми роторами расчет представлен в главе II. Необходимо сравнить результаты этого расчета с теми, которые будут получены для гармонично-синусоидальной и полно-синусоидальной схем.

1. Расчет эффективности преобразователя конструкции Псковского ГПИ с гармонично-синусоидальной схемой синхронизации

Главным достоинством псковского механизма для преобразования неравномерного движения роторов в равномерное вращение выходного вала считается возможность достижения высокой плавности преобразования.

Расчет эффективности производим по той же методике и с теми же исходными данными, что и в расчете, приведенном в главе II.

При гармонично-синусоидальной схеме преобразования возникает такая же динамика изменения межлопастного объема в РЛД, как и динамика изменения объема КС в цилиндре ПД с КШМ. Условную модель изменения давления в камере сгорания для такого РЛД принимаем аналогичной таковой, принятой для ПД в предыдущих расчетах, т.е. с максимальным давлением в камере сгорания равным 51 кгс/см².

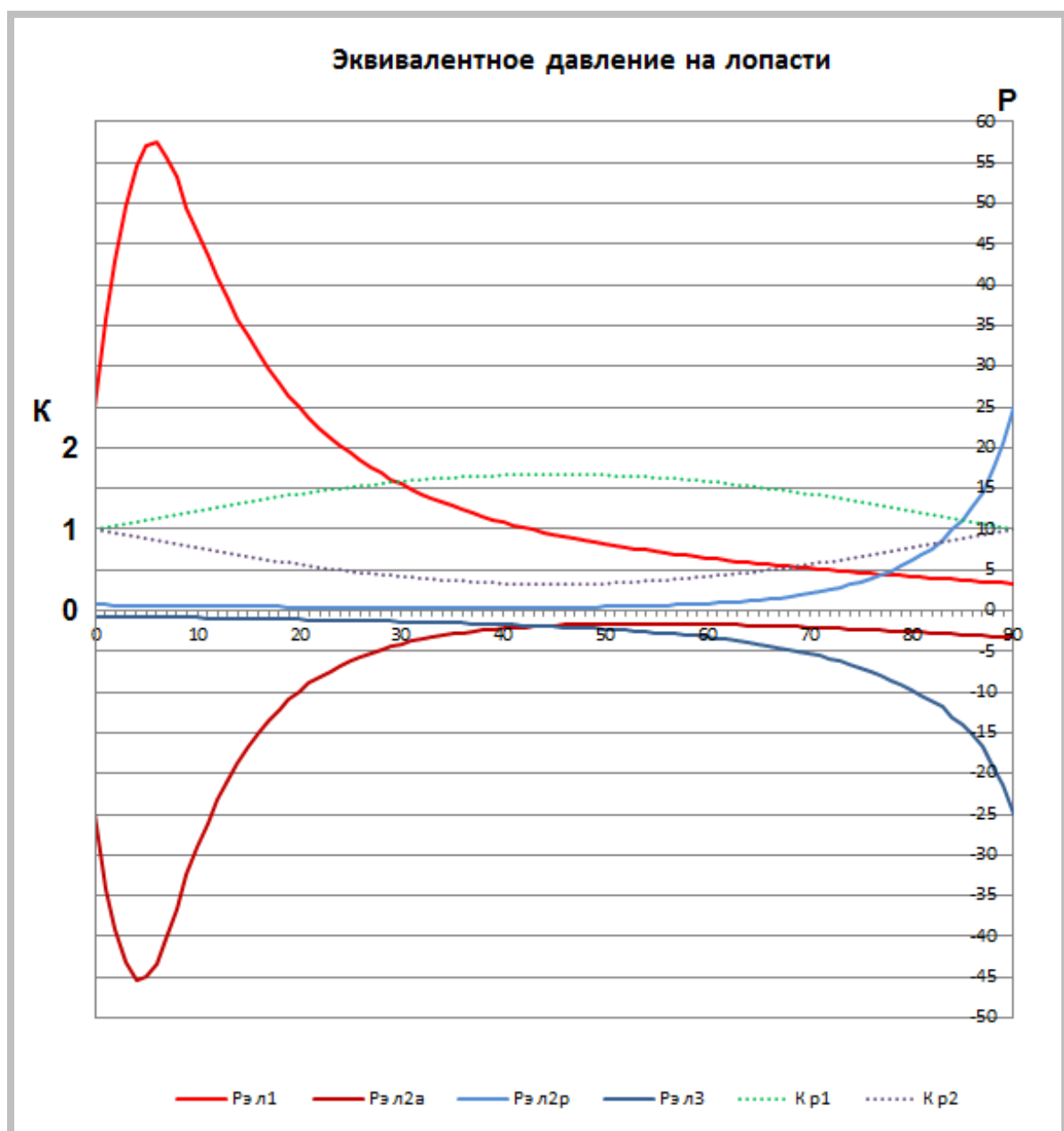


Для построения индикаторной диаграммы необходимо определить величины эквивалентного давления на лопасти.

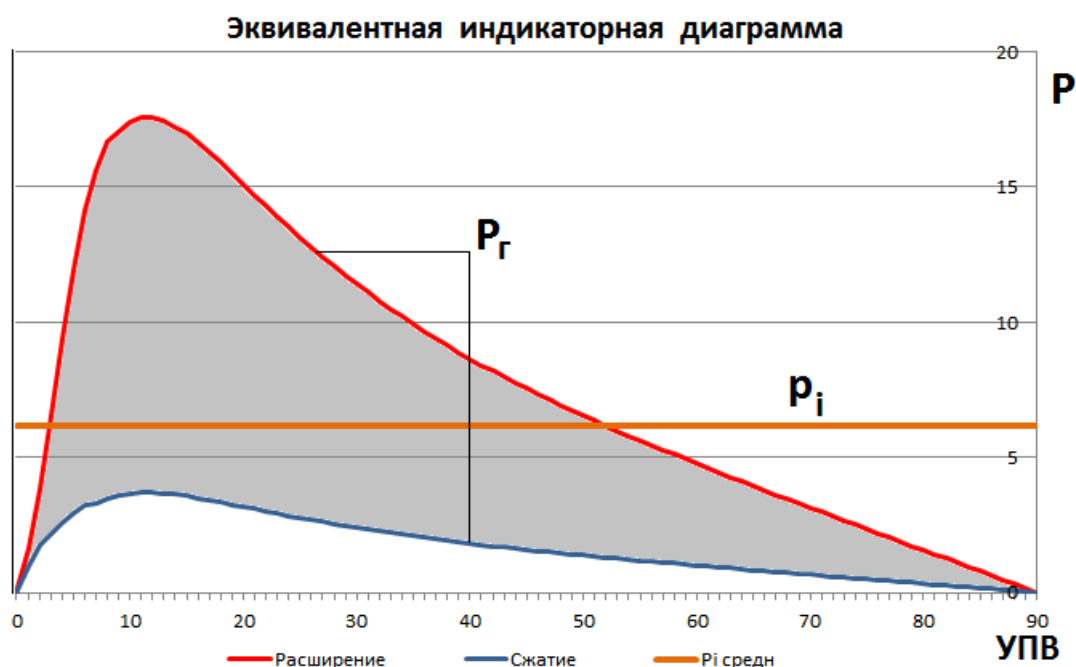
Амплитуды синусоид, отражающих закономерность изменения скоростей роторов и, соответственно, передаточных отношений, принимаются в соответствии с данными, представленными в публикациях Псковского ПГИ.

Таким образом, передача крутящего момента с роторов на вал происходит с передаточными отношениями, коэффициент **К** которых изменяется в пределах **0,33 ÷ 1 ÷ 1,67** ед. пропорционально изменению скорости роторов в пределах **33% ÷ 167%** от скорости вращения выходного вала.

Расчетным методом определяем значение эквивалентного давления передаваемого от лопастей на вал двигателя.



Сложив величины давлений в тактах расширения и сжатия, получаем эквивалентную индикаторную диаграмму.



Среднее эквивалентное индикаторное давление $p_i = 6,16 \text{ кгс/см}^2$ (или 0,604 МПа).

В результате расчетов получаем расчетную индикаторную мощность РЛД с псковским преобразователем $N_i = 338 \text{ кВт}$, индикаторный КПД - **0,26**.

Таким образом, РЛД с преобразователем, базирующемся на конкретно такой гармонично-синусоидальной схеме, будет работать с индикаторным КПД **в 1,5 раза меньшим**, чем ПД с КШМ, и **в 2 раза меньшим**, чем РЛД с преобразователем, базирующемся на схеме с останавливаемыми роторами, представленном в расчетах в главе II.

На основании данных промежуточных результатов можно сделать вывод о том, что чрезмерная плавность преобразования неравномерного вращательного движения лопастей в равномерное вращательное движение вала, отрицательно сказывается на достижении высоких индикаторных показателей двигателя внутреннего сгорания.

2. Расчет эффективности преобразователя с полно-синусоидальной схемой синхронизации

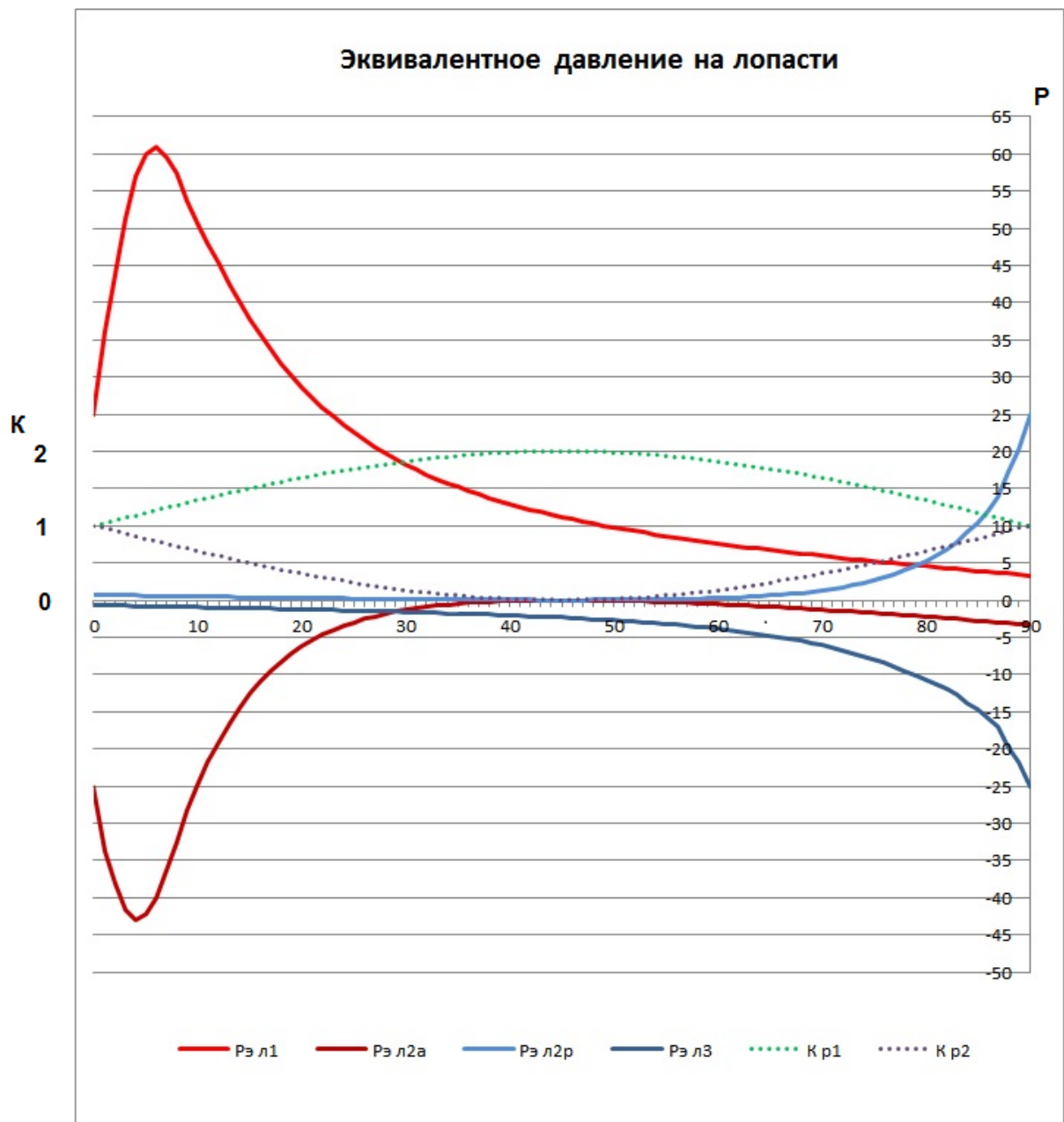
Расчет эффективности производим по той же методике и с теми же исходными данными, что и в расчете, приведенном в предыдущем разделе.

При полно-синусоидальной схеме преобразования будет возникать такая же динамика изменения межлопастного объема в РЛД, как и при гармонично-синусоидальной схеме преобразования, поэтому условная модель изменения давления в камере сгорания для такого РЛД остается такой же как и для случая в предыдущем разделе, т.е. с максимальным давлением в камере сгорания равным 51 кгс/см^2 .

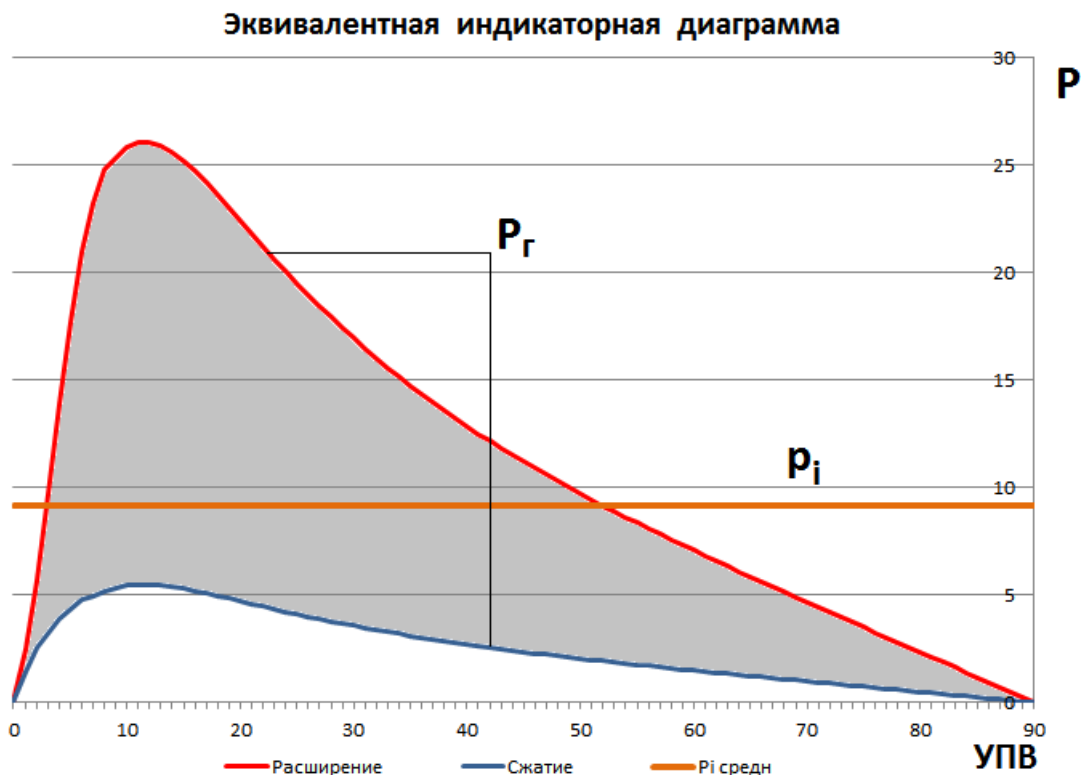
Для определения величины эквивалентного давления на лопасти при полно-синусоидальной схеме синхронизации следует отталкиваться от алгоритма

изменения скоростей вращения роторов, при которых передача крутящего момента с роторов на вал происходит с передаточными отношениями, коэффициент **К** которых изменяется в пределах **0 ÷ 1 ÷ 2** ед. пропорционально изменению скорости роторов в пределах **0 ÷ 100% ÷ 200%** от скорости вращения выходного вала.

Расчетным методом определяем значение эквивалентного давления передаваемого от лопастей на вал двигателя.



Сложив величины давлений в тактах расширения и сжатия, преобразовываем результат в эквивалентную индикаторную диаграмму.



Получено среднее эквивалентное индикаторное давление $p_i = 9,15 \text{ кгс/см}^2$ (или 0,897 МПа).

В результате получаем расчетную индикаторную мощность РЛД с полно-синусоидальной схемой синхронизации $N_i = 502 \text{ кВт}$, индикаторный КПД - **0,388**.

Полученные результаты расчета можно считать ожидаемыми в сравнении с расчетами ПД, ввиду аналогичной динамики изменения коэффициента преобразования энергии, о чем будет подробнее изложено ниже.

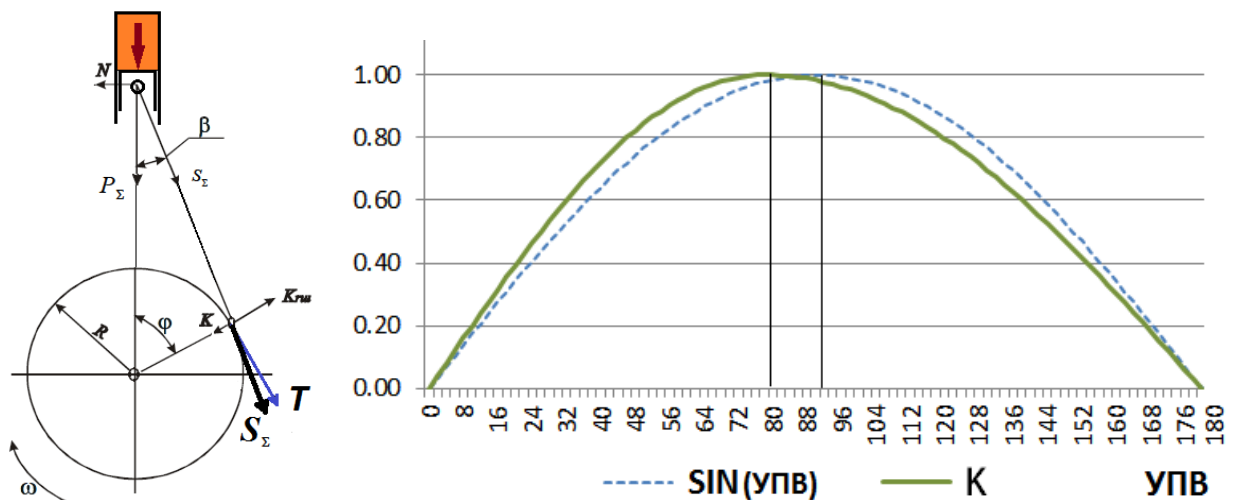
Показатель / двигатель	Поршневой с КШМ	РЛД с преобразователем по сх. с остан.рот.	РЛД с преобразователем по полно-син.сх.	РЛД с преобразователем по гарм.-син.сх.
Тактность	4-тактный			
Вид топлива	бензин			
Обороты макс. мощности	5000			
Рабочий объем секции (цилиндра)	1678,62 см ³			
Количество секций (цилиндров)	8	1		
Среднее индикаторное давление, МПа	0,913	1,184	0,897	0,604
индикаторная мощность, кВт	511	662	502	338
индикаторный КПД	0,395	0,512	0,388	0,261

3. Анализ различий в степени эффективности синусоидальных схем синхронизации

Полученные результаты обращают внимание на близость результатов, полученных для РЛД с полно-синусоидальной схемой синхронизации и ПД.

Стоит отметить, что у ПД характер динамики процентного изменения составляющей T (тангенциальной силы, создающей крутящий момент на валу двигателя) в раскладке силы S_{Σ} , действующей на плечо кривошипа вдоль шатуна, близок к синусоидальной зависимости от угла поворота коленчатого вала. График, отражающий такую зависимость, будет настолько отличен от исходной синусоиды, насколько длина конкретного шатуна будет отличаться от величины бесконечно длинного шатуна.

Таким образом, характер изменения составляющей T можно представить в виде коэффициента передаточного отношения K , характеризующего степень преобразования энергии газов в крутящий момент в зависимости от угла поворота коленчатого вала (УПВ). Для «усредненного» реального ПД экстремум графика функции K будет находиться в районе значения 78 градусов УПВ, т.е. при значении, когда «усредненный» шатун будет образовывать угол 90 градусов с линией, соединяющей ось вала и ось шейки кривошипа.



Логично предположить, что эффективность механизма преобразования РЛД с полно-синусоидальной схемой синхронизации будет аналогична эффективности преобразования энергии в условном ПД, у которого КШМ наделен бесконечно длинным шатуном.

Таким образом, чуть большее рассчитанное значение индикаторного КПД у ПД, в сравнении с таковым у РЛД с полно-синусоидальной схемой синхронизации, можно объяснить следствием смещения зоны высоких значений коэффициента K к зоне возникновения больших значений величины давления газов в КС.

Для дальнейших исследований эффективности РЛД есть смысл в принятии следующих гипотез.

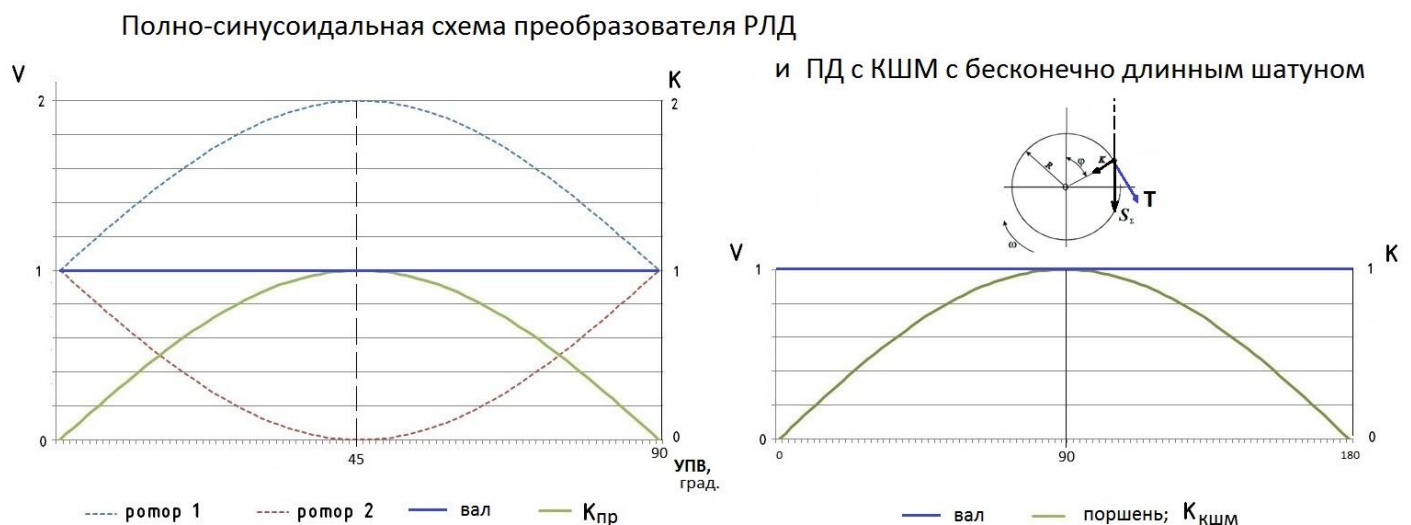
Гипотеза 1. При параметрах конструкции РЛД, когда преобразователь неравномерного вращения роторов в равномерное вращение выходного вала конструируется по схеме с **полно-синусоидальной зависимостью** синхронизации роторов, эффективность по преобразованию энергии расширяющихся газов в крутящий момент полностью соответствует эффективности преобразования энергии, получаемой в условиях условного ПД с КШМ с бесконечно длинным шатуном. Среднее эквивалентное индикаторное давление в условиях сравниваемых конструкций будет возникать равное.

При этом **средне-суммарное значение** скорости роторов РЛД и, соответственно, их передаточных отношений K в течение цикла, являющееся **постоянным значением**, является аналогом постоянных значений угловой скорости выходного вала и радиуса (плеча) кривошипа ПД в течение цикла.

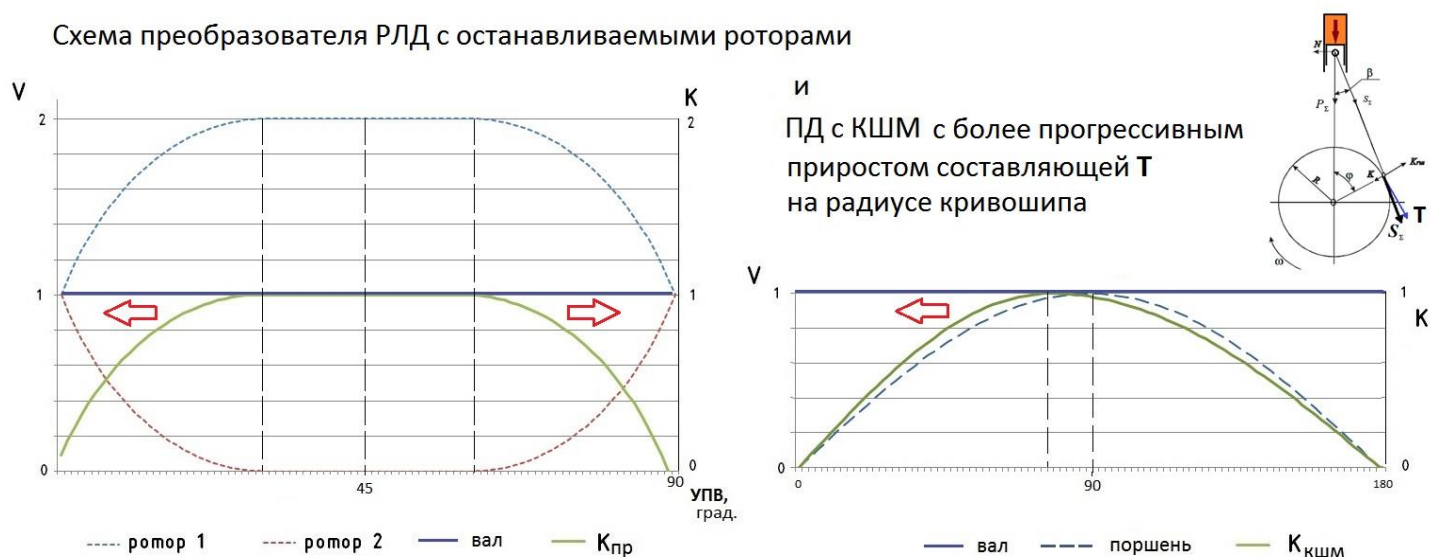
$$\frac{K_{P1} + K_{P2}}{2} = const \leftrightarrow R_{КШМ} = const$$

В то же время, **интегрированная** на выходном валу **разница значений** скорости двух роторов РЛД и, соответственно, их передаточных отношений K , является **переменным** значением коэффициента преобразования энергии преобразователя РЛД, которое также является аналогом переменных значений линейной скорости поршня и передаточного отношения $K_{КШМ}$, отражающего **переменную** процентную составляющую значения силы T , создающей крутящий момент на коленвале условного ПД с КШМ с бесконечно длинным шатуном.

$$\frac{K_{P1} - K_{P2}}{2} = K_{пр} \leftrightarrow K_{КШМ}$$



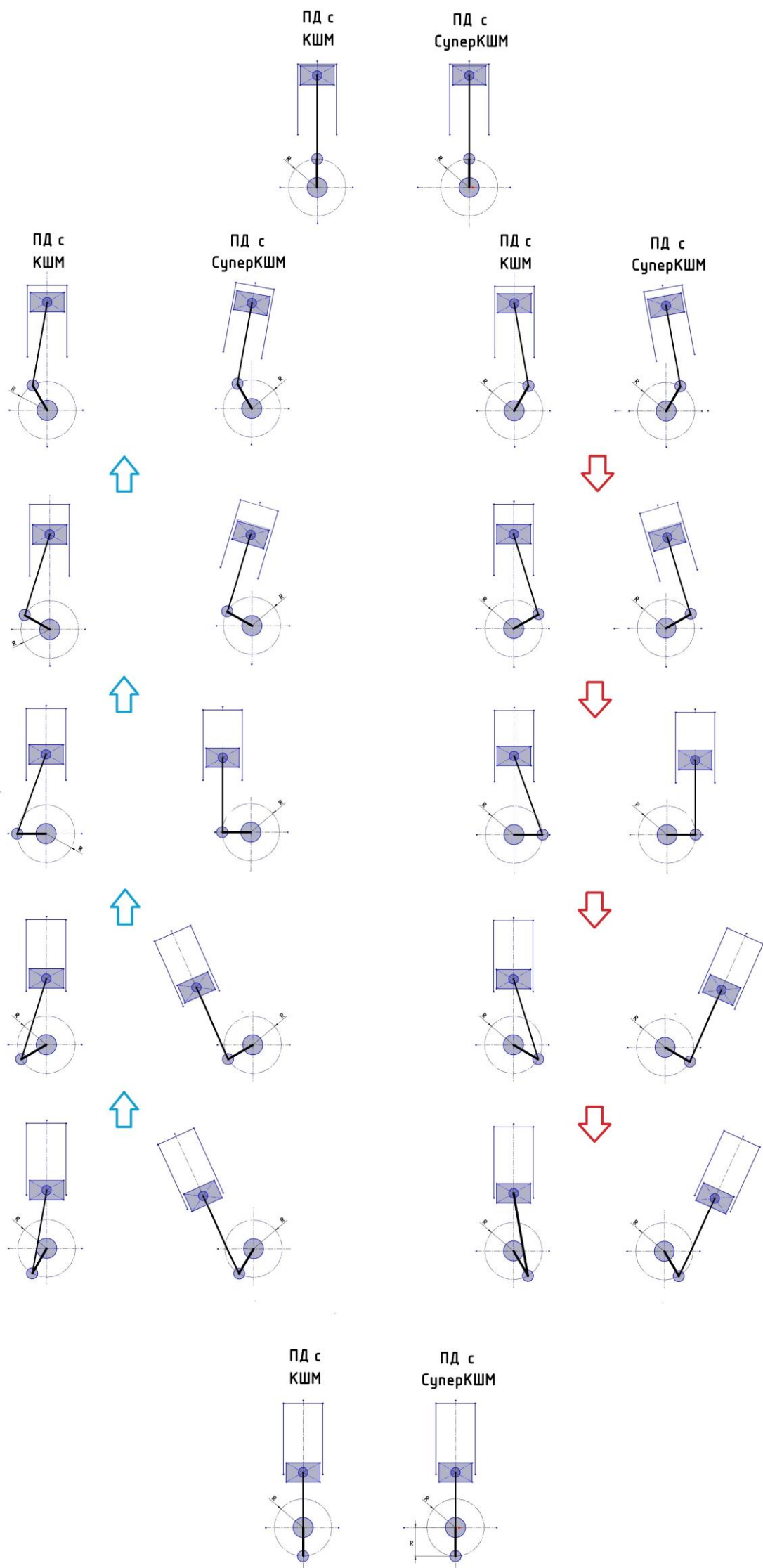
Гипотеза 2. При параметрах конструкции РЛД, когда преобразователь неравномерного вращения роторов в равномерное вращение выходного вала конструируется по схеме с **останавливаемыми роторами**, его эффективность по преобразованию энергии расширяющихся газов в крутящий момент будет прогрессировать подобно увеличению эффективности преобразования энергии получаемой в условиях условного ПД с КШМ, у которого переменное значение коэффициента силы T , создающей крутящий момент на коленвале, достигает своего максимального значения на более ранних углах поворота коленвала.



Однако, такое сравнение актуально только при малых периодах задержки ротора в остановленном положении

Большой эффект будет получаться при, соответственно, больших периодах удержания останавливаемого ротора (на 30-40 процентов длительности такта). При этом коэффициент преобразования энергии $K_{пр}$ будет образовывать широкую полку своего максимального значения в соответствии со свойствами преобразователя.

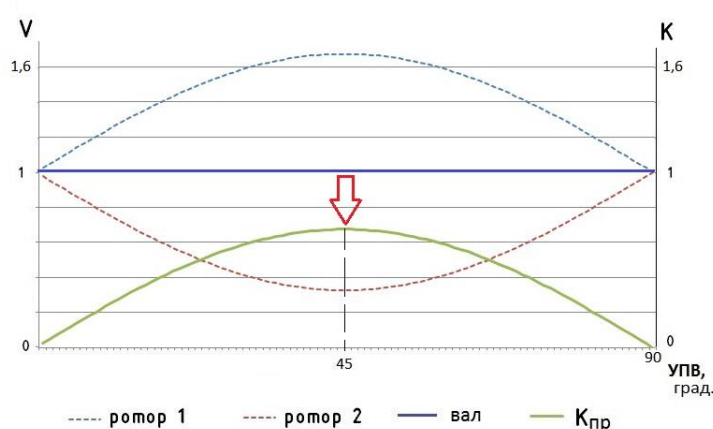
Такой эффект в условиях ПД можно было бы достичь, например (см. следующую иллюстрацию), при помощи гипотетического СуперКШМ, который бы позволял в течение первой трети такта приводить ось цилиндра к положению, приближающемуся к касательному её направлению по отношению к окружности, описываемой шейкой кривошипа. Вторую треть такта КШМ должен обеспечивать постоянную касательность оси цилиндра к указанной окружности, а за последнюю треть такта возвращать ось цилиндра к направленности на ось коленвала.



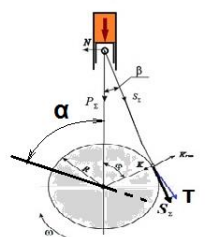
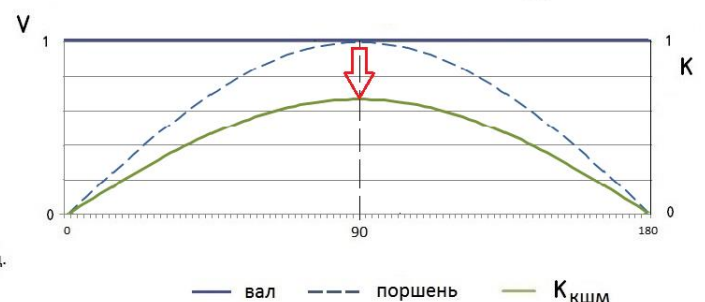
Гипотеза 3. При параметрах конструкции РЛД, когда преобразователь неравномерного вращения роторов в равномерное вращение выходного вала конструируется по **гармонично-синусоидальной схеме** синхронизации, его эффективность по преобразованию энергии расширяющихся газов в крутящий момент будет уменьшаться подобно уменьшению эффективности преобразования энергии получаемой в условиях условного ПД с КШМ, у которого переменное значение коэффициента силы T , создающей крутящий момент на коленвале, достигает своего максимального значения в середине цикла, но возникают еще другие факторы, снижающие эффективность преобразования, как если бы плоскость, в которой вращается шатунная шейка коленвала, и ось вала были наклонены под некоторым углом α , меньшим 90 градусов, к оси цилиндра. Чем больше отклонение оси вала от перпендикулярности к оси цилиндра, тем больше потери в эффективности преобразования.

Таким же образом, чем меньше амплитуда изменения скорости роторов по отношению к скорости вращения вала в РЛД, тем в большей степени страдает эффективность преобразователя.

Схема преобразователя РЛД с гармонично-синусоидальной синхронизацией роторов



и
ПД с КШМ с наклоном оси вала к оси цилиндра



IV. Выводы

Обязательная оговорка к принимаемым выводам: сравнение эффективности относится только к способам **механического** преобразования **одинакового** количества высвобождаемой энергии расширяющихся газов в условиях **равного** рабочего объема камеры сгорания сравниваемых двигателей.

1. Полученные результаты сравнительных расчетов позволяют предположить, что вне зависимости от вариативности технического исполнения механизмов преобразования энергии газов в крутящий момент, эффективность такого преобразования зависит, в первую очередь, от алгоритма изменения коэффициента преобразования в течение цикла.

2. Для эффективности РЛД внутреннего сгорания важна не столько степень плавности движения роторов, сколько эффективный алгоритм преобразования неравномерного вращения роторов в равномерное вращение выходного вала.

3. Более эффективным алгоритмом работы механизма преобразования будет такой, при котором скорость увеличения значений коэффициента преобразования энергии будет в большей мере соответствовать скорости нарастания давления в КС и, кроме того, эффект будет еще большим, если продолжительность сохранения этого коэффициента на максимальных значениях в течение рабочего цикла двигателя также будет увеличена. Такой алгоритм преобразования позволит сократить паразитные нагрузки на механизм и эффективнее трансформировать энергию расширяющихся газов в крутящий момент на валу двигателя.