

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКРУТКИ МНОГОЦИЛИНДРОВОГО ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**В.В. Грачев**

*д.т.н., профессор кафедры «Локомотивы и ЛХ» ФГБОУ ВО ПГУПС*

**А.В. Грищенко**

*д.т.н., профессор кафедры «Локомотивы и ЛХ» ФГБОУ ВО ПГУПС*

**Ф.Ю.Базилевский**

*к.т.н., доцент кафедры «Локомотивы и ЛХ» ФГБОУ ВО ПГУПС*

**Ю.Ю.Шумилов**

*ассистент кафедры «Локомотивы и ЛХ» ФГБОУ ВО ПГУПС*

**Аннотация.** Высокооборотные двигатели небольшой размерности находят все более широкое применение в качестве первичных двигателей тепловозов с многодвигательными силовыми установками. В связи с этим актуальной является задача разработки методов контроля их технического состояния в эксплуатации. В статье приведены результаты исследования процесса холодной предпусковой прокрутки двигателя на математической модели, на основании анализа которых предлагается метод контроля технического состояния многоцилиндрового двигателя по изменению мгновенной угловой скорости коленчатого вала и тока стартерного электродвигателя в период холодной предпусковой прокрутки.

**Ключевые слова:** холодная прокрутка, мгновенная угловая скорость, коленчатого вал, ток стартерного электродвигателя, эквивалентный диаметр утечек, степень сжатия.

### **Постановка задачи**

Все более широкое применение высокооборотных дизельных двигателей малой размерности, не имеющих индикаторных кранов, в качестве первичных двигателей многодвигательных силовых установок тепловозов [1] обуславливает актуальность разработки и применения методов контроля их технического состояния, исключающих необходимость снятия и анализа индикаторной диаграммы рабочего процесса. Ряд таких методов основан на анализе изменения мгновенной угловой скорости (МУС) коленчатого вала и тока стартерного электродвигателя (СТД) в период предпусковой холодной прокрутки [2, 3].

Функция контроля МУС и тока СТД реализована в большинстве мотор-тестеров, применяемых для диагностирования малолитражных автомобильных двигателей [4], однако анализ этих сигналов сводится к визуальному сравнению пределов их изменения на угловых секторах поворота коленчатого вала (ПКВ), соответствующих разным цилиндрам двигателя. Такой подход позволяет эффективно выявлять только полную потерю газоплотности отдельных цилиндров, что во многих случаях достаточно для систем диагностики автомобильных двигателей, но совершенно недостаточно для систем бортовой диагностики силовых установок тепловозов. Последние, наряду с задачами контроля работоспособности двигателя,

решают задачи прогнозирования изменения его технического состояния, контроля качества ремонта, оперативного контроля энергоэффективности в процессе эксплуатации, причем в автоматическом или полуавтоматическом режимах.

Результаты стендовых испытаний дизеля типа Д50 (6ЧНЗ1,8/33) в режиме холодной прокрутки КВ, приведенные в [5], показывают, что способы диагностики, основанные на анализе изменения сигналов МУС и тока СТД в период холодной прокрутки, могут быть актуальны и для дизелей большей размерности, позволяя осуществлять оперативный контроль состояния цилиндра – поршневой группы (ЦПГ) в процессе эксплуатации, при условии выбора диагностических параметров, признаков и критериев, допускающих автоматизацию процесса диагностирования.

В этой же работе предлагается использовать в качестве диагностических параметров для такого контроля относительные отклонения средних значений угловой скорости КВ  $\overline{\omega_j^{cp}}$  на секторах ПКВ цилиндров:

$$\overline{\omega_j^{cp}} = \frac{\omega_j^{cp} - \omega_{cp}}{\omega_{cp}}, \quad (1)$$

где  $\omega_j^{cp}$  – средняя угловая скорость КВ на секторе ПКВ  $j$ -го цилиндра, с<sup>-1</sup>;  
 $\omega_{cp}$  – среднецикловая угловая скорость КВ, с<sup>-1</sup>;  
 $j$  – номер цилиндра по порядку работы.

С использованием параметров (1) вычисляются диагностические признаки:

$$\overline{\Delta\omega_j^{cp}} = (\overline{\omega_j^{cp}} - \overline{\omega_{j+1}^{cp}}), \quad (2)$$

Диагностическим критерием, характеризующим изменение текущего ТС ЦПГ  $j$ -го цилиндра по сравнению с эталонным ТС, является изменение значения признака (2) в текущем ТС цилиндра.

Результаты холодной прокрутки КВ дизеля с открытыми индикаторными кранами, приведенные в [5], подтверждают эффективность предложенных диагностических критериев и признаков для выявления существенных отклонений (ухудшений) технического состояния отдельных цилиндров дизеля.

Вместе с тем возможность использования предложенного подхода к диагностированию ЦПГ цилиндров для решения задач прогнозирования изменения их состояния и определения остаточного ресурса требует дополнительного исследования. Кроме того, требует уточнения возможность интегральной оценки технического состояния ЦПГ дизеля в целом при ее постепенном износе.

Экспериментальный способ решения этих задач, особенно для дизеля большой размерности, сопряжен со значительными затратами материальных и временных ресурсов, необходимых для многократной переборки ЦПГ.

Более рациональным представляется использование для указанных исследований математической модели процесса холодной прокрутки КВ дизеля с последующей экспериментальной проверкой основных результатов.

Целью статьи является исследование процесса холодной прокрутки дизеля Д50 (6ЧН31,8/33) на математической модели и анализ полученных результатов. В ходе исследования решаются следующие задачи:

- определение диагностических признаков и критериев для интегральной оценки состояния ЦПГ дизеля в процессе прокрутки;
- оценка влияния нарушения регулировок (линейной величины камеры сжатия) и ухудшения ТС отдельных цилиндров на изменения диагностических признаков (1) и критериев (2) в процессе прокрутки.

### **Выбор метода исследования**

Для исследования используется ранее разработанная математическая модель холодной предпусковой прокрутки дизеля, включающая модели рабочих процессов в каждом из цилиндров дизеля, модель коленчатого вала, вращающегося под действием вращающего момента стартерного двигателя, с определением суммарного момента тангенциальных сил, действующих на шатунные шейки КВ, и момента механических потерь в поршневой машине, а также модель электрической цепи стартерного электродвигателя [6].

Проверка адекватности модели выполнялась посредством сравнения результатов моделирования холодной прокрутки дизеля Д50 с результатами стендовых испытаний дизель-генератора 2ДГ50 в режиме холодной прокрутки [5].

Среднеквадратическая относительная погрешность (RMSE) моделирования индикаторной диаграммы в ее информативной области ( $\pm 60$  гр. ПКВ от ВМТ цилиндра) не превышает 6,5%, абсолютная погрешность находится в пределах 0,1 МПа.

Относительная погрешность моделирования изменения мгновенной угловой скорости КВ и тока стартерного двигателя в процессе прокрутки находится в пределах 2,5%.

Соотношение относительных отклонений средних значений угловой скорости коленчатого вала и тока стартерного двигателя на секторах цилиндров, полученное в результате моделирования, полностью соответствует результатам испытаний, совпадение численные значений вполне удовлетворительное.

Полученные результаты позволяют использовать модель процесса холодной прокрутки дизеля для решения любых задач, связанных с контролем технического состояния цилиндро-поршневой группы дизеля в процессе предпусковой холодной прокрутки.

### **Обсуждение результатов**

#### **Интегральный контроль технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя**

Значения напряжения  $U_{AB}$  СТАБ, ток СТД  $I_{СТД}$  и угловая скорость КВ  $\omega$  в процессе прокрутки связаны уравнением электродвигателя постоянного тока, записанного для мгновенных значений тока и напряжения [6]:

$$L \cdot \frac{di_{\text{СТД}}}{dt} = u_{\text{АБ}} - i_{\text{СТД}} \cdot R - C_E \cdot \omega \cdot \Phi(i_{\text{СТД}}), \quad (3)$$

где  $C_E$  - электромашинная постоянная СТД;

$\Phi(i_{\text{СТД}})$  - магнитный поток главных полюсов СТД, определяемый его кривой намагничивания, в·с;

$R$  - сопротивление цепи СТД, Ом;

$L$  - индуктивность цепи СТД, Гн.

Момент СТД постоянного тока с последовательным возбуждением, действующий на коленчатый вал во время его прокрутки, определяется выражением:

$$M_{\text{СТД}} = C_M \cdot i_{\text{СТД}} \cdot \Phi(i_{\text{СТД}}) = C'_M \cdot i_{\text{СТД}}^2, \quad (4)$$

где  $C'_M$  – коэффициент, учитывающий значение электромашинной постоянной двигателя  $C_M$  и связь тока обмотки возбуждения с магнитным потоком,  $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{А}^2}$ .

Моментом нагрузки для СТД является суммарный момент тангенциальных сил, действующих на шейки КВ со стороны шатунов, и момент механических потерь в поршневой машине двигателя.

Среднее за цикл значение момента тангенциальной силы, действующего на шатунную шейку коленчатого вала при его прокрутке, определяется величиной отрицательной индикаторной работы, совершаемой в соответствующем цилиндре, которая зависит, главным образом, от эквивалентного диаметра утечек в цилиндре (т.е. от ТС его ЦПГ) и средней угловой скорости КВ. Косвенное влияние на величину отрицательной индикаторной работы в цилиндрах дизеля при его прокрутке оказывает также регулировка линейной величины камер сжатия при сборке ЦПГ, поскольку увеличение давления на такте сжатия, наряду с увеличением отрицательной работы газа, сопровождается повышенными утечками рабочего тела из цилиндра и уменьшением положительной работы на такте расширения.

Момент механических потерь прогретого двигателя в период прокрутки практически полностью определяется среднецикловой угловой скоростью вращения КВ [7].

Таким образом, при текущем техническом состоянии и регулировках ЦПГ среднее за цикл значение момента на валу двигателя при прокрутке, уравниваемое моментом СТД, определяется средней угловой скоростью вала при прокрутке. Изменение технического состояния и регулировок ЦПГ должно сопровождаться изменением среднего момента на валу двигателя при прокрутке, момента СТД и, с учетом (4), среднего значения его тока для каждого значения средней угловой скорости КВ.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты моделирования процесса холодной прокрутки дизеля с различным ТС ЦПГ (эквивалентным диаметром утечек (ЭДУ) во всех шести цилиндрах) при различных значениях напряжения АБ.

Как следует из рисунка 1, изменение (увеличение) значения ЭДУ во всех цилиндрах на 2,0 мм (на 0, 004% от площади поперечного сечения цилиндра)

вследствие равномерного постепенного износа ЦПГ приводит к увеличению среднего за цикл тока СТД более, чем на 20%. При этом изменение степени сжатия оказывает существенно меньшее влияние на величину тока прокрутки. Как следует из рисунка, изменение степени сжатия во всех цилиндрах с 12,5 до 14,5 приводит к увеличению среднего тока прокрутки не более, чем на 1,5% за счет увеличения тепловых потерь в стенке камеры сгорания.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности использования зависимости среднего за цикл тока СТД от среднего за цикл значения угловой скорости КВ в период прокрутки в качестве диагностического признака, характеризующего текущее техническое состояние ЦПГ. Средние значения тока СТД и угловой скорости КВ определяются из следующих выражений:

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^N (\omega_j \cdot \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^N \Delta t_j}, \quad i_{\text{СТДср}} = \frac{\sum_{j=1}^N (i_{\text{АВ}j} \cdot \Delta j)}{\sum_{j=1}^N \Delta j}, \quad (5)$$

где  $\omega_j$ ,  $i_{\text{СТД}j}$  - отсчет угловой скорости КВ и тока СТД на  $j$ -м зубе модулятора, с<sup>-1</sup>, А;  
 $\Delta t_j$  - время поворота модулятора от  $j$ -го до  $(j+1)$ -го зуба, с;  
 $N$  - количество отсчетов за цикл.

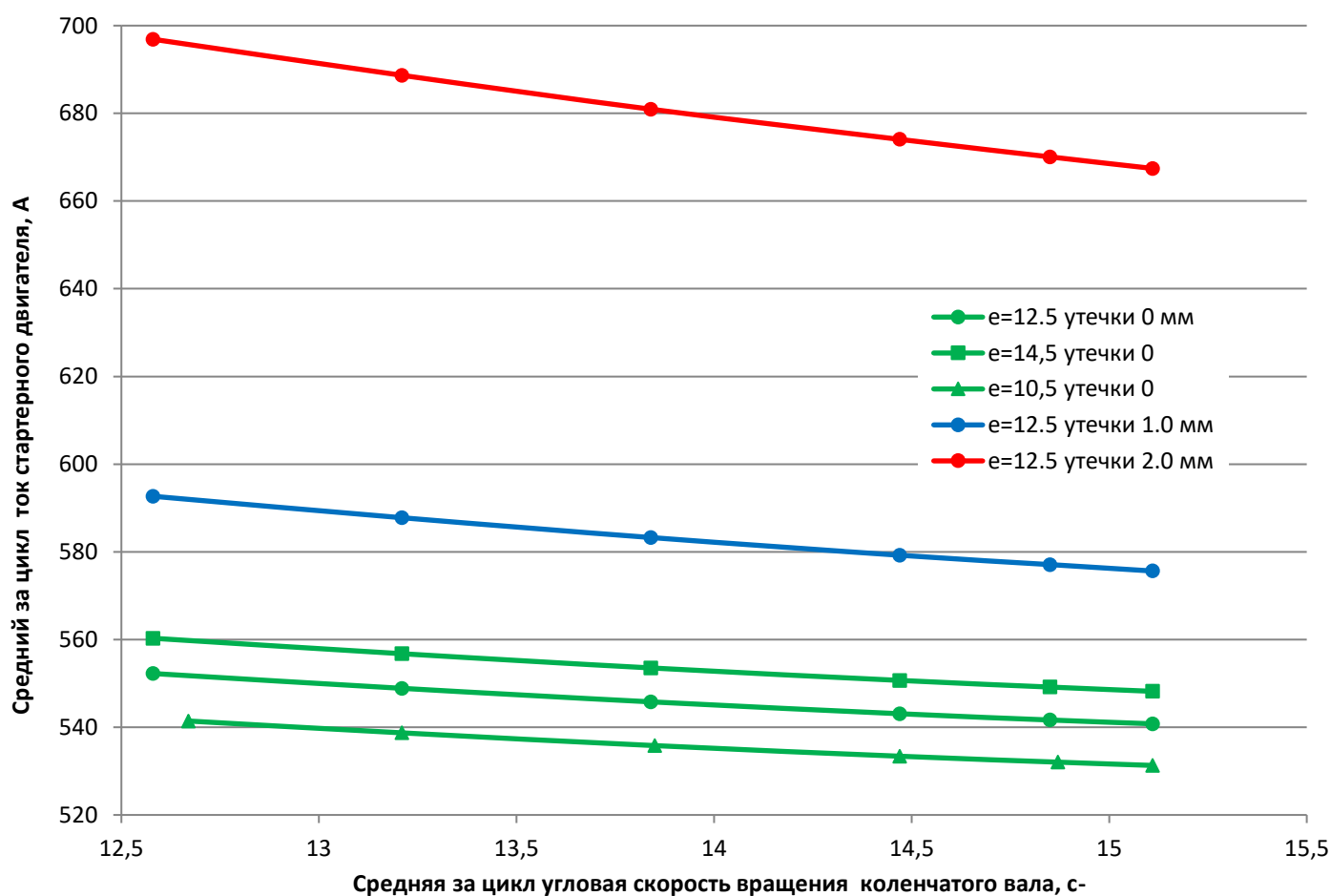


Рисунок 1 - Зависимость среднего тока СТД от средней угловой скорости КВ при разных значениях ЭДУ и степени сжатия цилиндров

Необходимо отметить, что указанный характер изменения тока СТД при увеличении износа ЦПГ противоречит весьма распространенному представлению о снижении среднего суммарного момента тангенциальных сил на шатунных шейках коленчатого вала и, соответственно, среднего тока СТД при увеличении утечек заряда из КС цилиндров.

На самом деле следствием постепенного увеличения эквивалентного диаметра утечек является уменьшение давления на такте расширения вследствие утечек заряда из камеры сжатия (КС) цилиндра при сохранении его примерно постоянным на протяжении большей части такта сжатия. Это приводит к увеличению отрицательной индикаторной работы, которое эквивалентно увеличению среднего момента нагрузки и тока СТД при прокрутке (рисунок 2). При полном отсутствии утечек величина отрицательной индикаторной работы определяется только снижением давления в период предварительного (свободного) выпуска и потерями тепловой энергии в стенке КС.

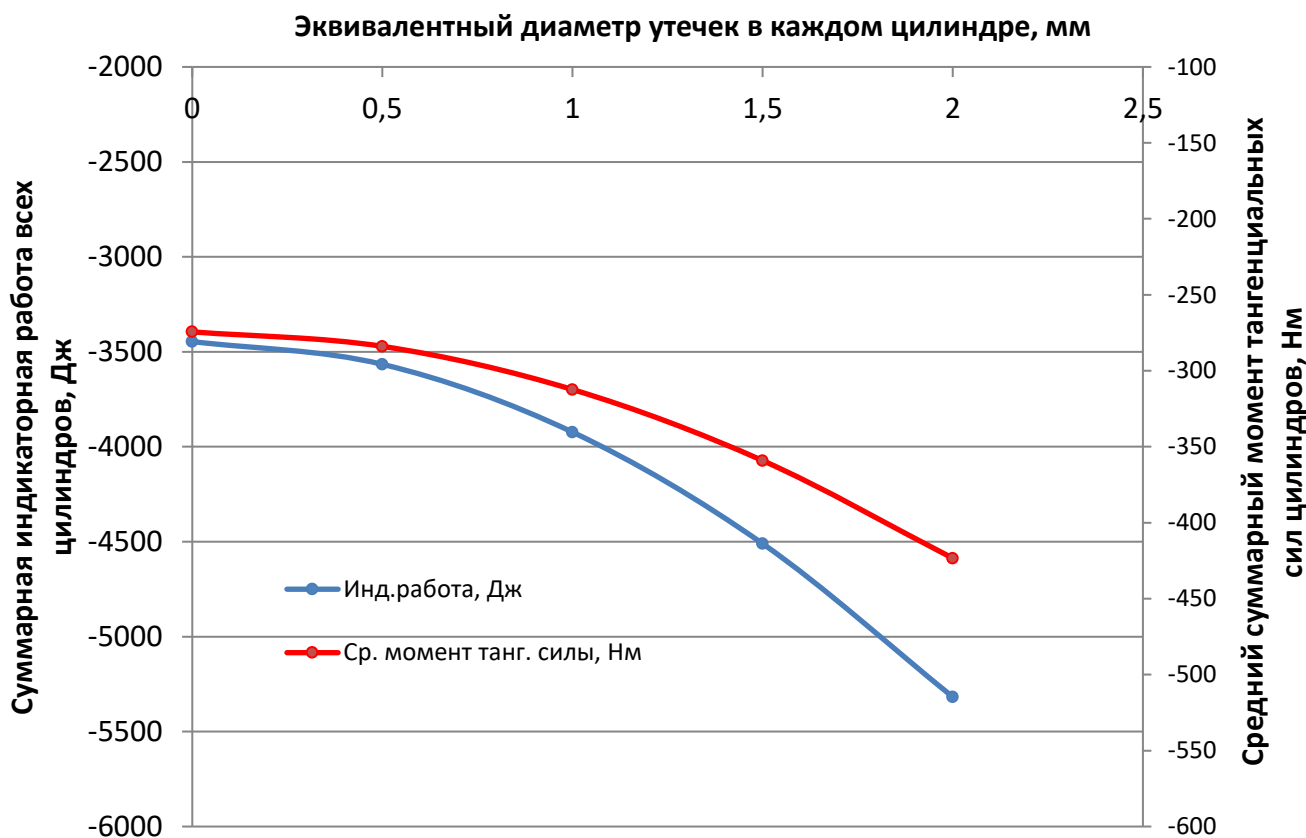


Рисунок 2 - Зависимость суммарной индикаторной работы и среднего суммарного момента тангенциальных сил цилиндров от эквивалентного диаметра утечек.

В качестве подтверждения можно привести экспериментальные зависимости средней угловой скорости прокрутки  $\omega_{\text{ср}}$  и среднего тока СТД  $i_{\text{СТДср}}$  от количества открытых индикаторных кранов цилиндров (рисунок 3), полученные в ходе стендовых испытаний дизель-генератора 2ДГ50 [5]. Из них следует, что при неизменном напряжении источника питания СТД угловая скорость прокрутки КВ снижается, а средний ток СТД растет по мере увеличения количества открытых кранов цилиндров.

Расчеты показывают, что характер влияния утечек заряда из КС на изменение угловой скорости и тока СТД кардинально изменяется либо при очень больших эквивалентных диаметрах утечек (для дизеля типа Д50 более 20 мм), либо при малых средних угловых скоростях прокрутки (менее  $1,5 \text{ с}^{-1}$ ), вызванных снижением напряжения стартерной аккумуляторной батареи при разрядке стартерным током вследствие ее недостаточной емкости. И в том, и в другом случае значительная часть заряда успевает покинуть цилиндр еще на такте сжатия, уменьшая величину отрицательной работы.

Именно на этом основана рекомендация открывать часть индикаторных кранов цилиндров при пуске дизеля с разряженной стартерной аккумуляторной батареей, не обеспечивающей даже минимальную угловую скорость проворота коленчатого вала.

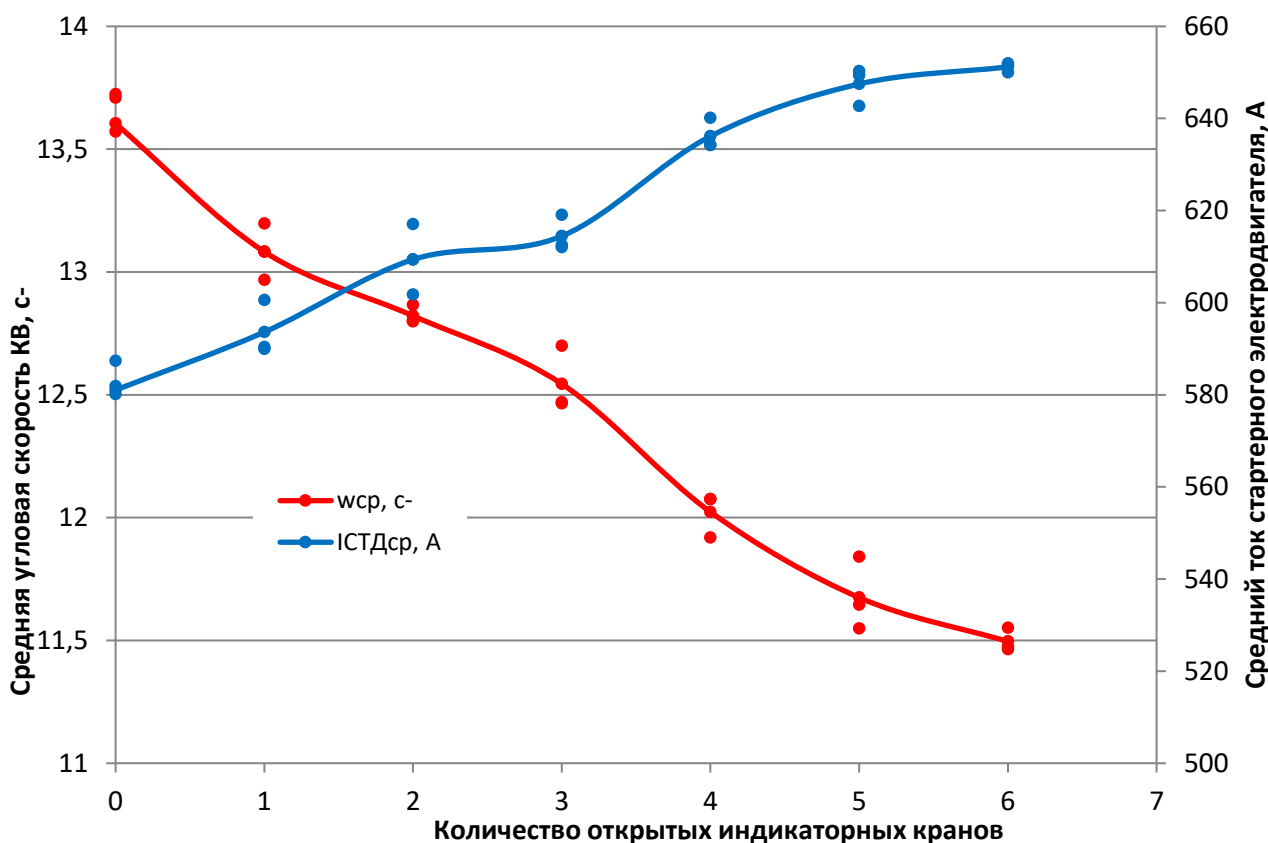


Рисунок 3 - Экспериментальные зависимости значений  $\omega_{ср}$  и  $i_{СТД_{ср}}$  от количества открытых индикаторных кранов цилиндров

Однако постановка и решение задачи оценки ТС ЦПГ дизеля в таком состоянии и в таких режимах не имеет смысла, поэтому их исследование выходит за рамки данной работы. Для обеспечения практической применимости результатов исследования достаточно ограничить пригодную для диагностирования область режимов прокрутки минимальной установившейся средней частотой вращения КВ  $5,5 \text{ с}^{-1}$  (для дизелей ряда Д50).

Таким образом, приведенные результаты позволяют определить параметры  $\omega_{ср}$  и  $i_{СТД_{ср}}$ , предложенные для интегральной оценки состояния ЦПГ дизеля в процессе холодной прокрутки, как обладающие достаточной чувствительностью, информативностью и однозначностью.

Поскольку, кроме величины отрицательной индикаторной работы цилиндров и соответствующего суммарного момента тангенциальных сил, момент нагрузки СТД при прокрутке также зависит от уровня потерь на трение в поршневой машине, достоверность диагностирования будет определяться соблюдением примерного постоянства теплового состояния двигателя при диагностировании.

Помимо зависимостей  $i_{\text{СТДср}} = f(\omega_{\text{ср}})$ , характеризующих ТС ЦПГ, в процессе диагностирования необходимо также контролировать зависимость  $i_{\text{СТДср}} = f(u_{\text{АБср}}, \omega_{\text{ср}})$ , характеризующую состояние стартерного электродвигателя и стартерной аккумуляторной батареи. Вполне очевидно, что при существенном отклонении их от нормы диагностирование теряет смысл.

### Контроль технического состояния отдельных цилиндров

В [5] для сравнительной оценки относительных отклонений средних значений МУС на секторах цилиндров (1) предлагается представлять их в виде лепестковой диаграммы с количеством вершин, равным количеству цилиндров двигателя. При равномерной работе (одинаковом состоянии) всех цилиндров такая диаграмма будет представлять собой многоугольник, близкий к правильному (рисунок 4).

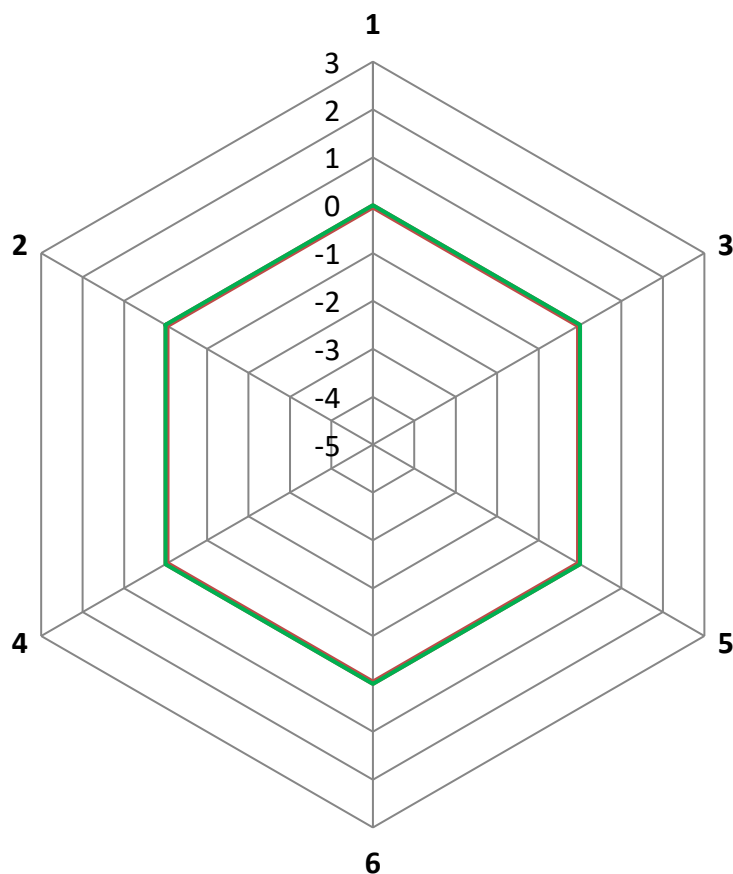


Рисунок 4 - Диаграмма относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{\text{ср}}}, j = 1 \dots 6$ ) при равномерной работе цилиндров шестицилиндрового дизеля

При изменении технического состояния или регулировки ЦПГ цилиндра изменяется величина среднего момента на шейке коленчатого вала, что приводит к изменению средней угловой скорости КВ на секторе ПКВ, соответствующем этому

цилиндру, и ее относительного отклонения от среднециклового значения. Следствием этого изменения является искажение формы лепестковой диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров. На рисунках 5 и 6 приведены результаты моделирования процесса ХП при увеличении (с 12,5 до 13,5) и уменьшении (с 12,5 до 11,5) степени сжатия первого цилиндра.

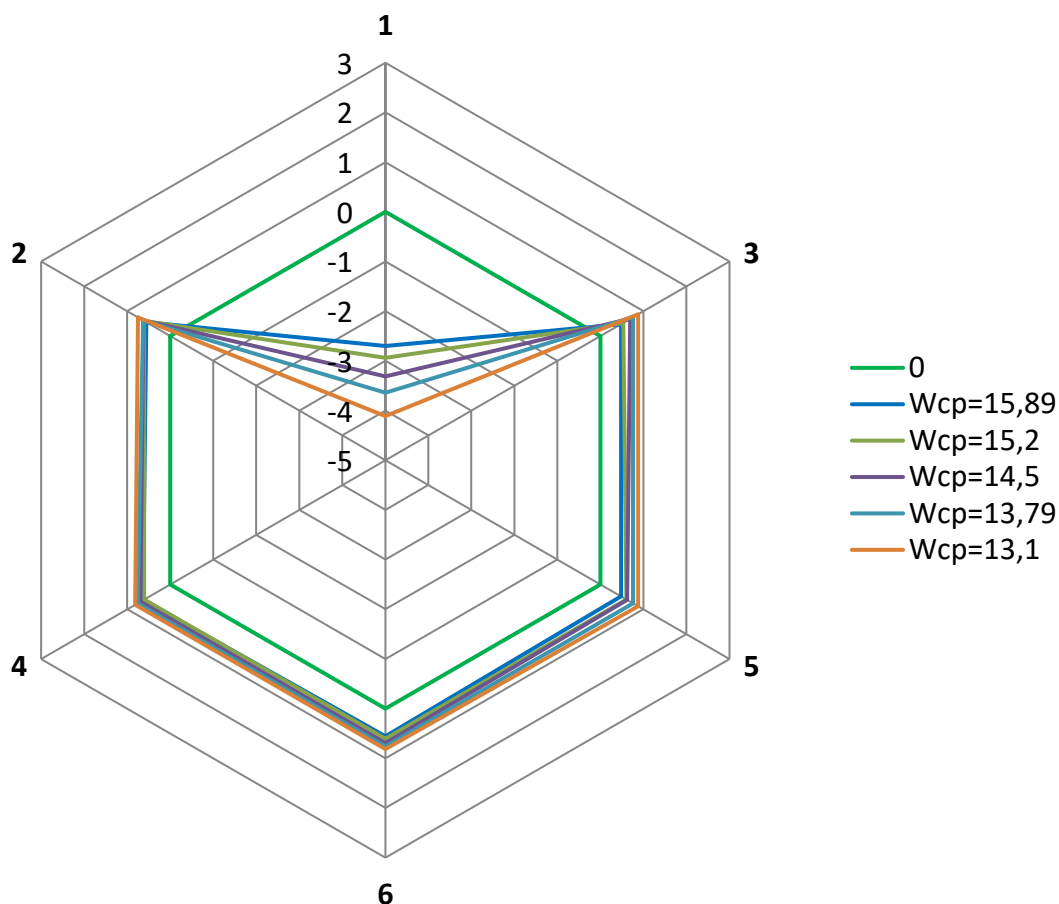


Рисунок 5 - Диаграмма относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}}, j = 1 \dots 6$ ) при увеличении степени сжатия первого цилиндра до 13,5 при разных значениях среднецикловой угловой скорости КВ

Как следует из рисунков, изменение степени сжатия в цилиндре при отсутствии утечек приводит к противоположному изменению величины  $\overline{\Delta\omega_j^{cp}}$  на секторе ПКВ, соответствующем этому цилиндру. Характер изменения  $\overline{\Delta\omega_j^{cp}}$  не зависит от среднецикловой угловой скорости КВ, однако величина этого изменения возрастает по мере снижения  $\omega_{cp}$  ввиду того, что абсолютное значение изменения угловой скорости КВ на секторе ПКВ цилиндра (числитель выражения (1)) при отсутствии утечек определяется величиной отрицательной работы на такте сжатия и не зависит от величины среднецикловой угловой скорости КВ (знаменатель выражения (1)), что при уменьшении последней приводит к увеличению значения относительного отклонения.

Ухудшение технического состояния отдельных цилиндров (увеличение ЭДУ в отдельных цилиндрах) приводит к существенно отличному изменению формы диаграммы относительных отклонений угловых скоростей КВ.

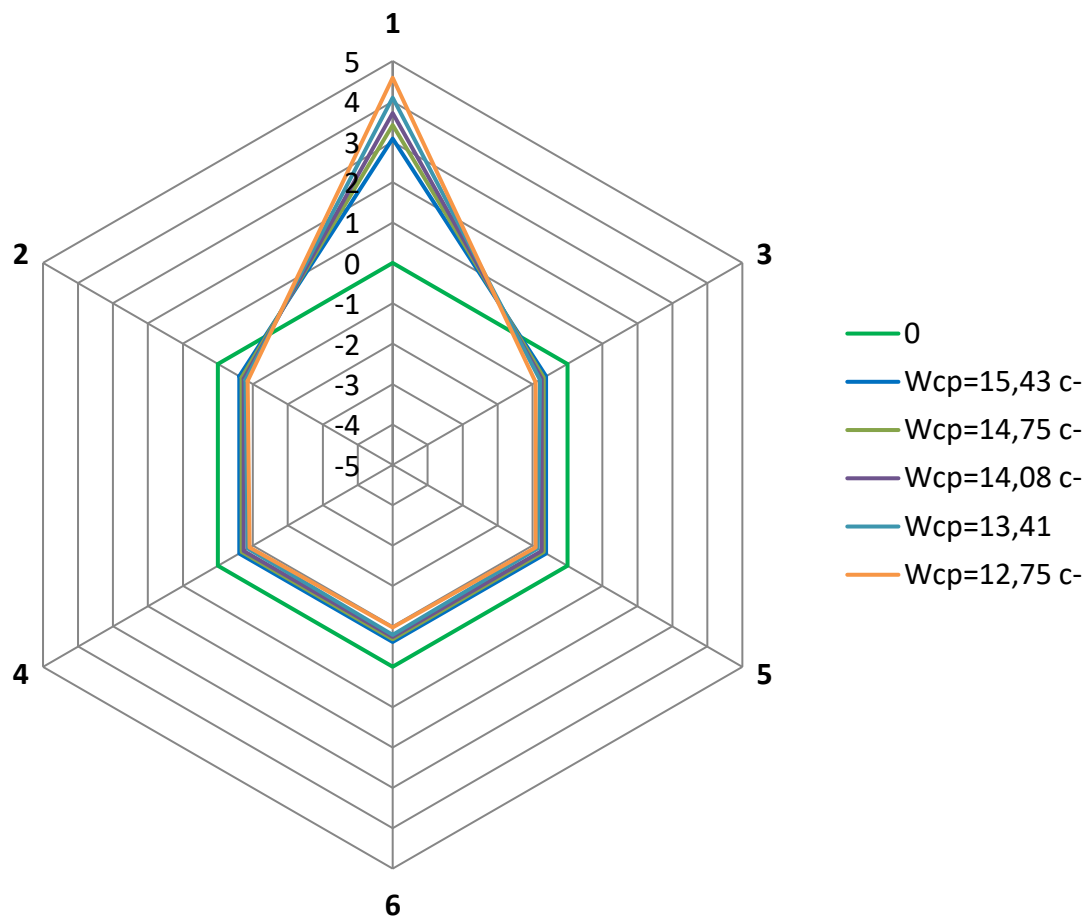


Рисунок 6 - Диаграмма относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}}, j = 1 \dots 6$ ) при уменьшении степени сжатия первого цилиндра до 11,5 при разных значениях среднецикловой угловой скорости КВ

На рисунке 7 приведена диаграмма, соответствующая соответствующим различным значениям ЭДУ мм в первом цилиндре. Как следует из рисунка, снижение газоплотности цилиндра приводит к увеличению МУС этого цилиндра (вследствие уменьшения отрицательной работы на такте сжатия) с одновременным снижением МУС следующего по порядку работы цилиндра (вследствие уменьшения положительной работы на такте расширения) и последующим увеличением угловых скоростей остальных цилиндров.

Характер влияния ЭДУ на форму диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров не зависит от среднецикловой угловой скорости  $\omega_{cp}$  вращения КВ, однако значения отклонений возрастают по мере ее снижения вследствие увеличения потерь заряда на тактах сжатия и расширения (рисунок 8).

Таким образом, использование в качестве диагностического критерия относительных отклонений угловых скоростей цилиндров позволяет однозначно идентифицировать отклонения линейной величины камеры сжатия и снижение газоплотности отдельных цилиндров многоцилиндрового дизеля.

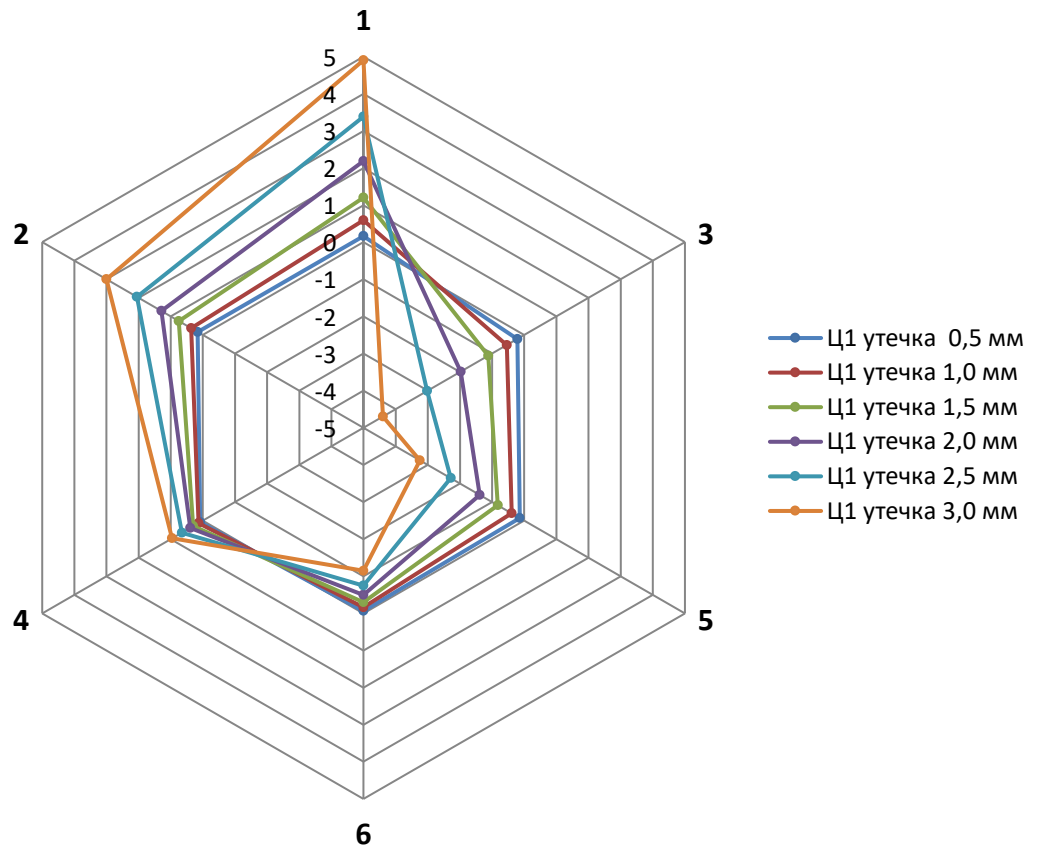


Рисунок 7 - Диаграмма относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}}$ ,  $j = 1 \dots 6$ ) при увеличении эквивалентного диаметра утечек в первом цилиндре

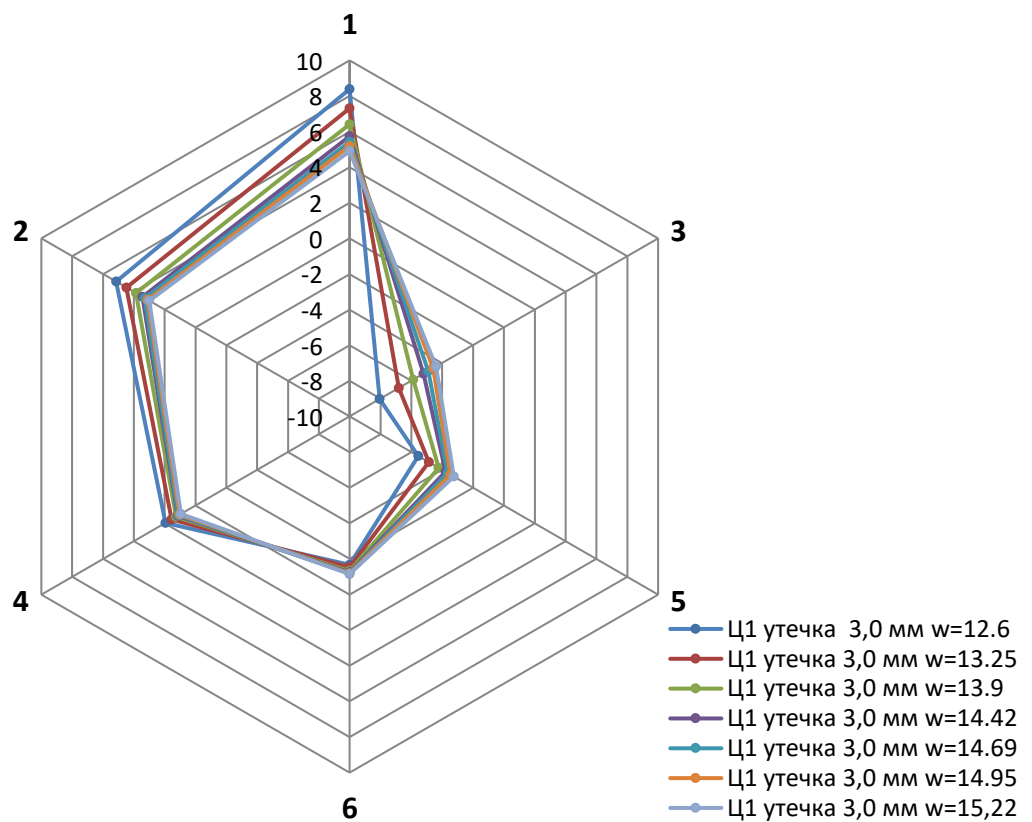


Рисунок 8 - Диаграмма относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}}$ ,  $j = 1 \dots 6$ ) при изменении среднецикловой угловой скорости КВ

В то же время оценка возможности идентификации множественных отказов с использованием данного критерия требует дополнительного исследования. На рисунке 9 приведены диаграммы относительных отклонений МУС цилиндров при увеличении степени сжатия в первом цилиндре до 14,5 с одновременным увеличением ЭДУ в нем до 2,0 мм (кривая 1) и при увеличении ЭДУ второго цилиндра до 3,0 мм без изменения степени сжатия. Как следует из рисунка, характер изменения формы обеих диаграмм практически идентичен, для идентификации требуется оценка количественных изменений отклонений.

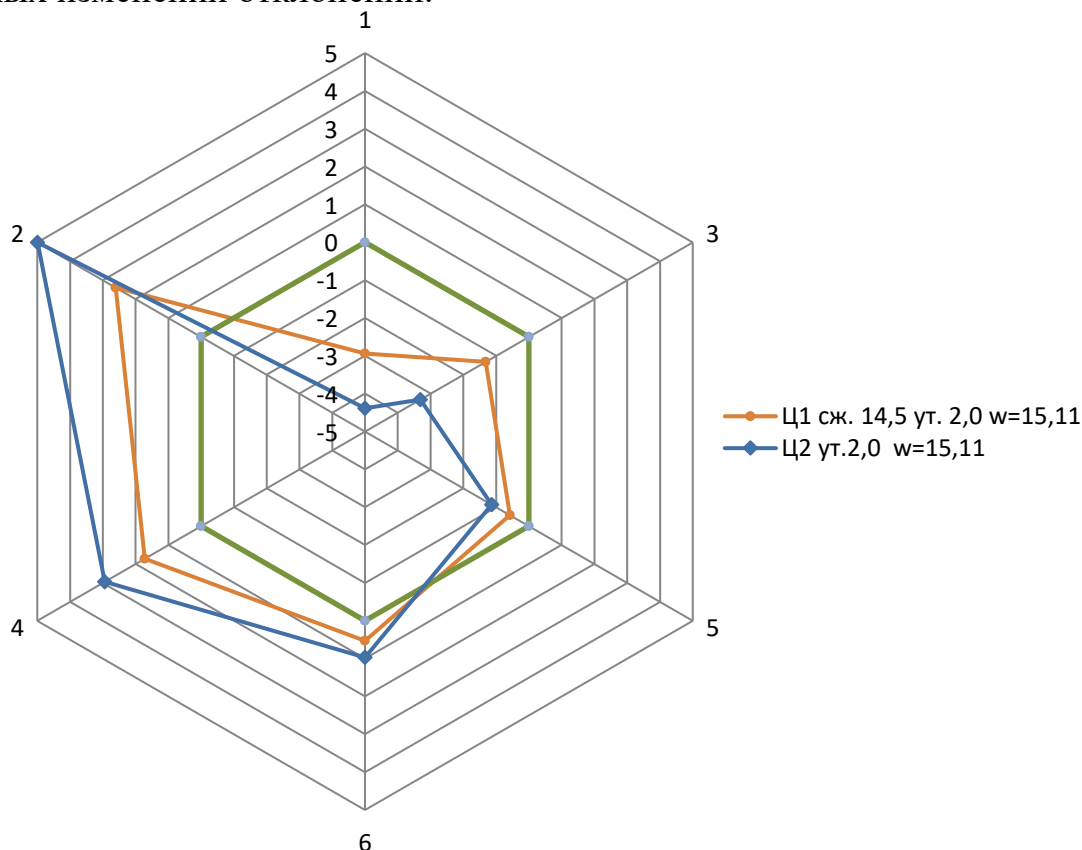


Рисунок 9 - Диаграммы относительных отклонений МУС ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{cp}}$ ,  $j = 1 \dots 6$ ) при увеличении степени сжатия первого цилиндра до 14,5 с одновременным увеличением ЭДУ в нем до 2,0 мм и увеличении ЭДУ во втором цилиндре до 3,0 мм.

Таким образом, использование относительных отклонений МУС на секторах цилиндров не позволяет надежно идентифицировать текущее состояние ЦПГ дизеля при наличии ее множественных отказов.

Однако с помощью предлагаемого критерия может осуществляться эффективный контроль изменения технического состояния дизеля в процессе эксплуатации. Для этого необходимо периодически контролировать изменение относительных отклонений МУС цилиндров.

На рисунке 10 приведена диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров при увеличении ЭДУ первого цилиндра, в котором при сборке ЦПГ установлена уменьшенная линейная величина КС (увеличена степень сжатия с 12,5 до 14,5).

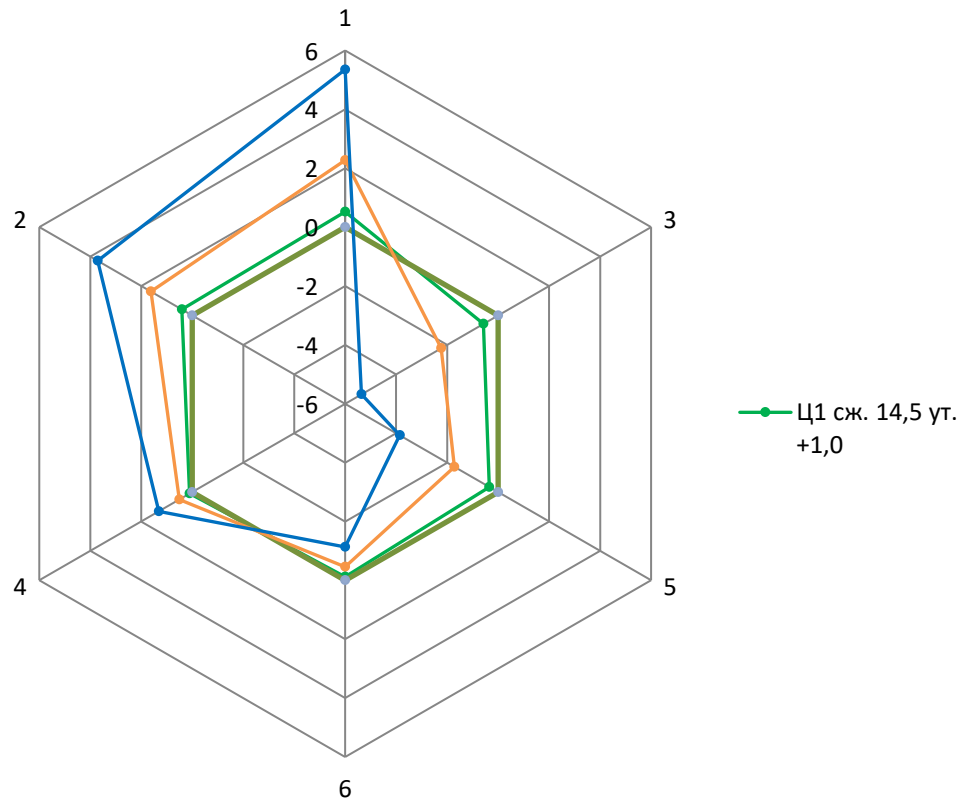


Рисунок 10 – Диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров ( $1000 \cdot (\overline{\Delta\omega_j^{\text{cp ЭДУ}1_i}} - \overline{\Delta\omega_j^{\text{cp ЭДУ}1_0}})$ ,  $j = 1 \dots 6$ ) при увеличении ЭДУ в первом цилиндре от 0 до 3,0 мм

На рисунке 11 приведена диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров при уменьшении степени сжатия первого цилиндра с сохранением ЭДУ на уровне 2,0 мм.

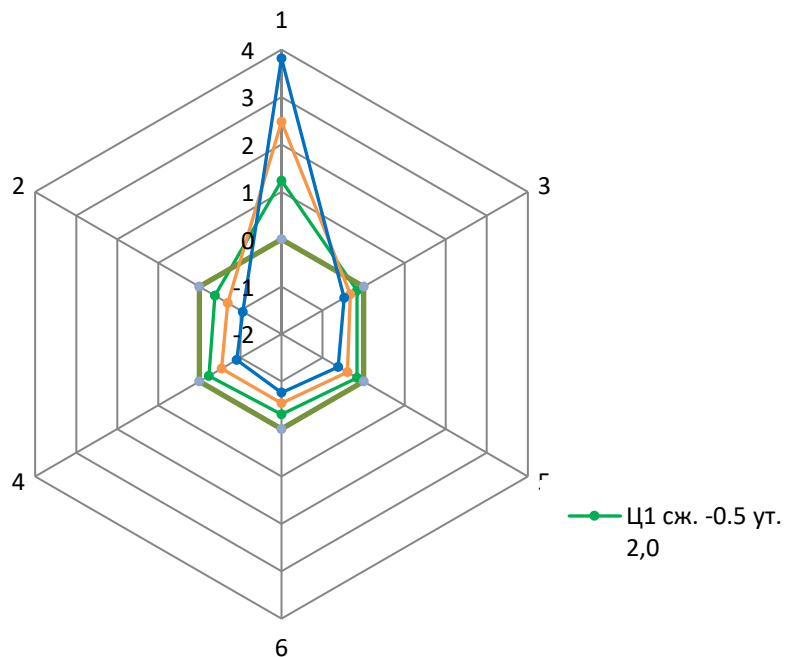


Рисунок 11 – Диаграмма изменений относительных отклонений МУС цилиндров ( $1000 \cdot (\overline{\Delta\omega_j^{\text{cp сж}1_i}} - \overline{\Delta\omega_j^{\text{cp сж}1_0}})$ ,  $j = 1 \dots 6$ ) при уменьшении степени сжатия в первом цилиндре с 14,50 до 13,0

Как следует из рисунка 11, предлагаемый критерий достаточно чувствителен к изменению степени сжатия в цилиндре, что создает предпосылки для использования его в целях контроля износа подшипников коленчатого вала дизелей небольшой размерности. Так, для дизельного двигателя КАМАЗ-740 (8ЧН12/12, тепловоз ТЭМ23 [1]) увеличение линейной величины камеры сжатия цилиндра на 0,6 мм (при износе шатунных и коренных вкладышей на 0,3 мм) приведет к снижению степени сжатия с 17 до 15,74, что, как следует из рисунка 11, приводит к заметному изменению формы диаграммы МУС цилиндров.

### **Выводы**

Анализ результатов исследования процесса холодной предпусковой прокрутки коленчатого вала дизеля на математической модели позволяет сделать следующие выводы.

1. Зависимость среднего тока стартерного электродвигателя от средней угловой скорости коленчатого вала за цикл в период прокрутки может использоваться в качестве интегрального показателя состояния (газоплотности) ЦПГ дизеля.

2. Относительное отклонение средней угловой скорости КВ на секторах цилиндров ( $1000 \cdot \overline{\Delta\omega_j^{CP}}, j = 1 \dots 6$ ) может эффективно использоваться для контроля технического состояния и качества сборки цилиндро – поршневой группы отдельных цилиндров многоцилиндрового дизеля при отсутствии смежных отказов.

3. При наличии смежных отказов (существенных отклонений величины степени сжатия и эквивалентного диаметра утечек одновременно в нескольких цилиндрах) совокупность относительных отклонений средних угловых скоростей на секторах цилиндров не всегда обеспечивает надежную идентификацию отказов.

4. Контроль изменения относительных отклонений средних угловых скоростей КВ на секторах цилиндров в сочетании с зависимостью среднего тока прокрутки от средней за цикл угловой скорости КВ позволяют достоверно контролировать изменение технического состояния ЦПГ дизеля в процессе эксплуатации.

5. Чувствительность средней угловой скорости КВ на секторе цилиндра к изменению степени сжатия позволяет использовать предлагаемый критерий для контроля износа подшипников коленчатого вала дизеля.

### **Список использованных источников**

1. Тепловоз ТЭМ23 /Текст: – электронный // URL: [https://tmholding.ru/upload/TEM23\\_06.pdf](https://tmholding.ru/upload/TEM23_06.pdf) (дата обращения 22.02.2025).

2. Бабошин, А. А. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по току, потребляемому стартером при прокрутке двигателя / А. А. Бабошин, А. С. Косарев, В. С. Малышев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 33-39.

3. Нечаев, В.В. Методики технического диагностирования цилиндро-поршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала/В.В.Нечаев, Е.В.Воробьев, А.А.Тарасенко *Текст – электронный* //Инженерный

вестник Дона. Электронный научный журнал – Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – 2018. – №3; URL: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5118](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5118) (дата публикации 2018 г.).

4. Губертус, Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей. Серия «Автомеханик» / Пер. с нем. Ю. Г. Грудского. – М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004 г. – 176 с: ил.

5. Грачев, В.В. Контроль технического состояния цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля в период предпусковой холодной прокрутки / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 9(762). – С. 95-107. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-9-95-107. – EDN EDBCTT.

6. Грачев, В.В. Математическая модель процесса холодной прокрутки многоцилиндрового дизеля / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 11(764). – С. 61-70. – DOI 10.18698/0536-1044-2023-11-61-70. – EDN IDDEFA.

7. Путинцев, С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний: Учебное пособие / С.В.Путинцев // Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М., 2011. – 274 с., илл.