

А.Н. Савельев¹, М.В. Кипервассер¹, Д.С. Аниканов²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

² ООО «ПНУ» ОК «Сибшахтострой»

К ОБОСНОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Большая часть современных технологических машин является сложными техническими системами со значительными энергосиловыми показателями. При передаче энергии от электродвигателя к исполнительному органу машины узлы и детали последней испытывают различные виды интенсивного силового воздействия. В большинстве случаев эти нагрузки не превышают расчетных значений, но даже в этом случае постоянное воздействие на элементы машины приводит к постепенному их износу и в конечном итоге выходу из строя. Сами эти причины индивидуальны для каждого типа машин, а их спектр весьма разнообразен. В силу этого момент выхода элементов машины из строя слабо поддается прогнозированию. С другой стороны, сложность и тяжесть повреждения определяют внеплановую продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт и, в итоге, сумму общего ущерба [1], которая в тяжелой промышленности составляет значительную величину. В этой связи своевременное и точное определение места и характера повреждения технологического оборудования методами диагностики является крайне актуальной задачей.

При ранее действующей в тяжелой промышленности системе планово-предупредительных ремонтов существовал дежурный персонал, который, используя органолептические методы, оценивал состояние технологических агрегатов, что позволяло избегать основной части крупных аварий. В настоящее время все чаще действуют имеющиеся возможности технической диагностики и, прежде всего, активно используют стационарные методы оценки состояния работоспособности технологического оборудования.

С точки зрения надежности работающей машины важно диагностирование состояния каждого ее элемента. В идеале существующие методики контроля должны были бы охватить все виды возможных неисправностей каждой детали, узла, агрегата и машины в целом. Однако такой подход в своей реализации весьма дорог и требует наличия значительного по составу штата сотрудников. С этих позиций система диагностики должна быть организована из расчета минимально-необходимого количества в ее составе элементов. Рассмотрим,

какими возможностями может располагать диагностическая система работающего в непрерывном режиме технологического агрегата. Для этого выполним декомпозицию механической части агрегата и оценим средства диагностики, которые могут быть использованы для элементов каждого уровня его сложности.

Декомпозиция технологического агрегата как сложной технической системы основывается на принципах декомпозиции, разработанных в теории формирования сложных технических систем [2], что позволяет последнюю представить как систему, состоящую из трех групп элементов (рис. 1): группу элементов $\{a_i\}$, обладающих качеством A ; группу элементов $\{\bar{a}_i\}$, имеющих противоположное качество \bar{A} , и группу элементов $\{a\bar{a}_i\}$ с качеством $A\bar{A}$, исключаям аннигиляцию элементов первых двух групп, т.е. обладающих качеством, индифферентным к качеству элементов первых двух групп. Такая модель сложной системы дает возможность разделить ее на три подсистемы элементов с качествами $(A, \bar{A}, A\bar{A})$ более низкого по сложности уровня. Если при делении получаются тоже сложные системы, их снова можно разделить на три составляющие, следующего более низкого по сложности уровня и т.д. Таким образом, может быть реализована декомпозиция любой сложной системы [2].

Декомпозируем технологический агрегат по уровням сложности на его составляющие (рис. 2) и оценим, какие из существующих диагностических методов при-

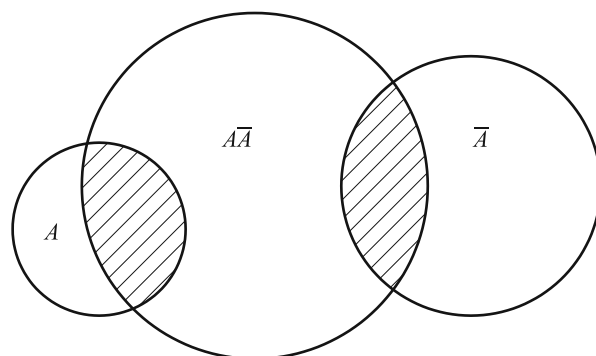


Рис. 1. Модель группирования элементов сложной технической системы по их качеству

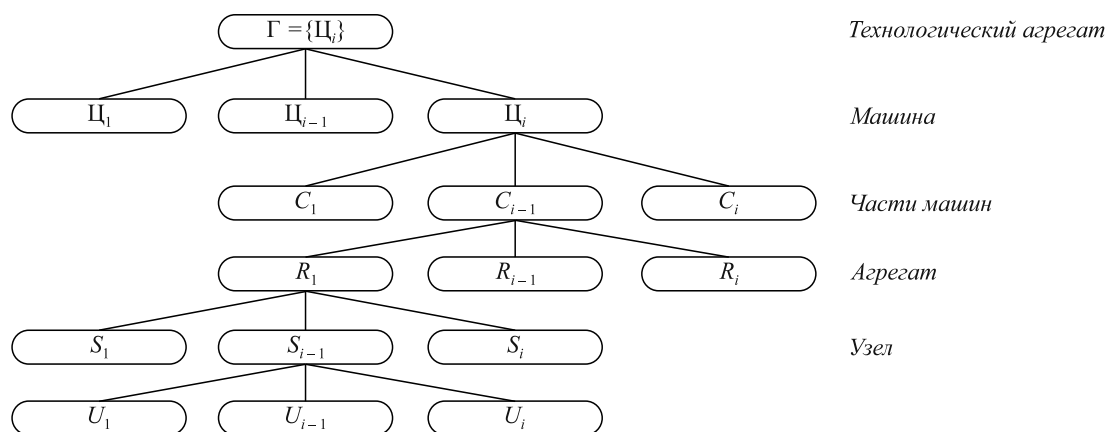


Рис. 2. Декомпозиция технологического объекта:

Γ – технологический агрегат в целом (ценоз), состоит из групп машин (конкретных ценозов) $\Pi_i = \{C_i\}$; C_i – семейство ценоза в виде частей машины технологического агрегата, $C_i = \{R_i\}$; R_i – род ценоза в виде агрегата машины, $R_i = \{S_i\}$; S_i – вид ценоза или узел машины, $S_i = \{U_i\}$; U_i – элемент узла машины

менимы к тому или иному уровню сложности технологического агрегата. Существующее на сегодняшний день количество методов технической диагностики не только значительно по своему числу, но и крайне разнообразно по своему применению. Выделим по условиям их применения три группы методов: 1 – методы, применяемые при изготовлении технологических агрегатов; 2 – используемые при диагностике неработающего технологического агрегата; 3 – для диагностики в процессе работы технологического агрегата, его машин, узлов и т.д. Все виды диагностики работающего агрегата основаны на том, что часть энергии, передаваемой от электродвигателя к инструменту агрегата, расходуется на различные виды потерь: трения, излучения в виде вибрации, тепла, звукового и других видов излучения. Все виды локальной диагностики построены на том, что фиксируют и оценивают размеры и характер энергетических потерь агрегата машины, узла агрегата и т.д. Характер распределения энергопотока в приводе машины показан на рис. 3, где приведены два варианта распределения энергии в машине – когда она исправна (сплошной фон) и когда она не исправна (затемненная часть рисунка). В первом случае потери мощности E_f , E_p в механической части привода не превышают допустимые значения. Соответственно диагностирующие

состояние машины приборы, регистрирующие ту или иную составляющую этих потерь, фиксируют нормальный режим ее работы. Затемненная часть рис. 3 показывает увеличение энергетических потерь, возникающих при износе оборудования в результате снижения работоспособности тех или иных элементов машины. Видно, что при износе оборудования значения E_f , E_p , символизирующие различного рода потери на трение, вибрацию, шумы, начинают расти.

Для осуществления комплексного диагностирования механизма существующими на сегодняшний день методами необходимо обеспечить контроль всех или большинства составных частей системы (узлов, агрегатов, деталей и т.д.). Одним из таких локальных методов, позволяющих диагностировать работу, прежде всего узлов машины технологического агрегата, является вибрационный анализ [3]. Этот метод решает задачи выявления момента появления неисправностей и оценки технического состояния, прежде всего, узлов машин. Для этого обрабатывается временной сигнал вибрации того или иного оборудования и по его параметрам делается оценка состояния элементов узла.

В тех случаях, когда узел машины или агрегата машины имеет систему проточной жидкой смазки, может быть использован метод химического анализа состава

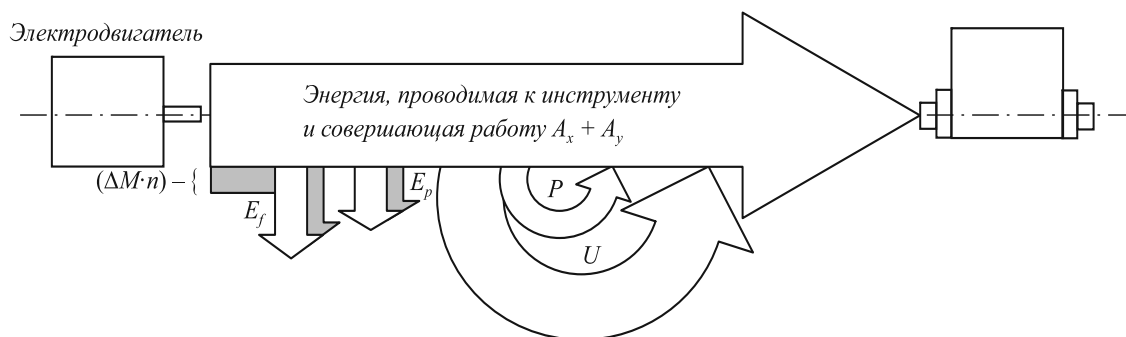


Рис. 3. Электромеханический привод машины (затемненная область соответствует повышенному объему потерь энергии)

ва смазки [4]. Применение анализа состояния смазки позволяет охватить диагностированием уже не только узел, но и агрегат машины, такой как редуктор, шестеренная клеть прокатных станков и т.д.

При диагностике неподвижных элементов машины используются закрепляемые на данном элементе тензодатчики. Они позволяют фиксировать деформационные процессы в конструкциях и судить тем самым о степени их работоспособности [5].

Еще одним методом диагностики неподвижных элементов работающей машины является диагностика с помощью фиксации акустических сигналов деформируемого элемента [6].

К методам, позволяющим оценивать работоспособное состояние подвижных узлов машины, относится электрорезистивный контроль [7]. Этот метод обеспечивает комплексную оценку состояния объекта, контроля макрогеометрии и появление дефектов его рабочих поверхностей, оценку толщины и фактического состояния разделяющей поверхности смазочной пленки и количественную оценку режима смазки в зоне трения. Перечень методов диагностирования элементов машины на этом не заканчивается. Распределим вышеотмеченные и ряд других методов диагностики по их возможности диагностировать состояние элементов машины, расположенных на том или ином уровне ее сложности (см. таблицу). Таблице соответствует диаграмма (рис. 4), где показана зависимость количества методов диагностики, которые можно применить для оценки работоспособности того или иного уровня сложности машины.

Как видно из таблицы и диаграммы, все широко известные методы контроля состояния элементов машин

Области применения известных методов диагностики машин и их компоненты

Методы диагностики	Область применения на уровне				
	элементов машины	узлов машины	агрегатов машины	частей машины	машины
Ультразвуковая дефектоскопия	+				
Вибрационная диагностика [3]		+	+		
Анализ химического состава технических жидкостей [4]		+	+		
Анализ температуры [4]		+	+		
Тензометрирование [5]	+				
Контроль положения механизма в пространстве			+	+	
Акустическая эмиссия [6]	+				
Электрорезистивный контроль [7]		+			

могут быть использованы только для локальной оценки работоспособности машины технологического агрегата. Метода, который позволял бы постоянно оценивать степень работоспособности всей машины в целом, в настоящий момент нет.

Известно, что все диагностические сигналы применяемых в оценке состояния работающей машины методов, являются результатом рассеивания энергии, подводимой к машине от электродвигателя. Если объем рассеивания энергии в силу постепенного выхода какого-либо из элементов машины увеличивается, это требует и увеличения потока энергии от электродвигателя. Этот факт может быть использован для полной оперативной оценки работоспособного состояния элементов машины. С энергетической точки зрения процесс выглядит следующим образом. Работа электродвигателя сопровождается непрерывным процессом преобразования электрической энергии в механическую, которая идет на совершение полезной работы (получение продукции) и энергетические потери в трансмиссии [1]. При этом механическую мощность, преобразованную машиной из электрической, можно выразить через параметры ее электрических цепей исходя из закона сохранения энергии. Начнем с определения мгновенной электрической мощности p_k , поступающей в контур k электродвигателя из сети, которая к нему присоединена [8]:

$$p_k = u_k i_k = R_k i_k^2 + i_k \sum_{n=1}^s L_{kn} \frac{di_n}{dt} + i_k \Omega \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}, \quad (1)$$

где u_k – напряжение k -го контура; i_k и i_n – токи k -го и n -го контуров; L_{kn} – взаимная индуктивность k -ой обмотки (n принимает любые значения от $n = 1$ до $n = s$, кроме $n = k$); $L_{kn} \frac{di_n}{dt}$ – трансформаторная ЭДС, связанная с изменением тока в n -ом контуре; $i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}$ – ЭДС вращения,

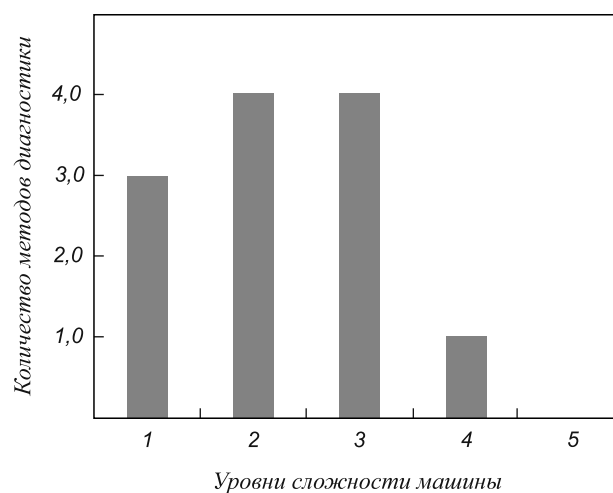


Рис. 4. Диаграмма количества методов диагностики, применяемых к определенным уровням сложности машины

связанная с изменением взаимной индуктивности в n -ом контуре (при $n \neq k$) или с изменением индуктивности k -го контура (при $n = k$); Ω – угловая скорость; R_k – сопротивление k -го контура; $R_k i_k^2$ – выделяемые в виде тепла потери мощности при преобразовании.

Суммируя мощности всех контуров, находим поступающую в контуры машины полную мгновенную электрическую мощность

$$\sum_{n=1}^s p_k = \sum_{n=1}^s R_k i_k^2 + \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s L_{kn} \frac{di_n}{dt} + \Omega \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}. \quad (2)$$

Известная часть мощности $\sum_{n=1}^s p_k$, поступающей в контуры, а именно $\sum_{n=1}^s R_k i_k^2$, выделяется в виде тепла в активных сопротивлениях R_k контуров и представляет собой потери мощности при преобразовании. Другая часть мощности идет на изменение энергии магнитного поля в машине вследствие изменения токов в контурах и индуктивностей. Так как энергия магнитного поля вычисляется по формуле

$$W = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n L_{kn}, \quad (3)$$

то ее полное приращение за время dt , в течение которого параметры i_k , i_n и L_{kn} имеют приращения di_k , di_n , dL_{kn} , равно

$$\begin{aligned} dW &= \frac{dW}{di_k} di_k + \frac{dW}{di_n} di_n + \frac{dW}{dL_{kn}} dL_{kn} = \\ &= \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s L_{kn} di_n + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n dL_{kn}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поэтому на изменение энергии магнитного поля расходуется мощность

$$p_W = \frac{dW}{dt} = \sum_{n=1}^s i_k \sum_{n=1}^s L_{kn} \frac{di_n}{dt} + \frac{\Omega}{2} \sum_{k=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}, \quad (5)$$

величина которой соответствует второму члену и половине третьего члена в выражении (1).

Остальная мощность преобразуется в механическую, передаваемую через вал к сопряженной машине:

$$p_{\text{мех}} = \sum_{k=1}^s p_k - p_\Sigma - p_W = \frac{\Omega}{2} \sum_{k=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}. \quad (6)$$

Из выражений (1) и (6) следует, что механическая мощность равна полусумме мощностей, определяемых как произведения токов контуров на ЭДС вращения.

Электромагнитный момент M , действующий на ротор в данное мгновение, может быть выражен через мгновенную механическую мощность $p_{\text{мех}}$ по форму-

ле (4) и при сравнении с выражением (2) получен в виде

$$M = \frac{p_{\text{мех}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s i_k \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}. \quad (7)$$

Приведенное выражение верно для любого типа электрической машины, работающей в любом режиме (генератор, двигатель).

В случае приближения механической части привода к аварийной ситуации очевидным образом возрастает на величину ΔM момент электродвигателя машины или сопряженного с машиной электрогенератора. Это в свою очередь приведет к отклонению электрических параметров электрических машин:

$$M + \Delta M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s (i_k + \Delta i_k) \sum_{n=1}^s i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}, \quad (8)$$

здесь Δi_k – приращение тока.

Приведенное выше выражение также верно для любого типа электрической машины, работающей в любом режиме (генератор, двигатель). Например, в двигателе постоянного тока независимого возбуждения в процессе преобразования электрической энергии в механическую участвуют две обмотки: якоря и возбуждения. Последняя создает магнитный поток в воздушном зазоре за счет протекающего в ней постоянного тока возбуждения i_n . На активные стороны секции обмотки якоря воздействуют механические силы (силы Ампера), возникающие при взаимодействии тока i_k секции с магнитным потоком обмотки возбуждения. Известно, что в зависимости от типа обмоток якоря (петлевая или волновая), она содержит две или иное четное число параллельных ветвей, каждая из которых также содержит несколько секций, включенных последовательно. В пределах одной ветви ток в секциях одинаковый: $I_b = I_a / (2a)$; здесь I_a – ток якоря; $2a$ – число параллельных ветвей.

ЭДС, наводимая в отдельной секции, определяется выражением $e = B_m \sin \gamma l v$, где B_m – максимальная индукция под полюсом; l – длина активных сторон секции; v – линейная скорость активных сторон; γ – угол поворота секции относительно оси полюса.

С учетом того обстоятельства, что ветвь содержит несколько секций с различным углом поворота γ , а линейная скорость v прямо пропорциональна угловой Ω , получим известное выражение ЭДС параллельной ветви и всей обмотки якоря: $E_a = c_o \Omega \Phi$, где c_o – постоянная; Φ – магнитный поток пар полюсов.

Тогда выражения для механической мощности и момента запишутся как

$$p_{\text{мех}} = I_a E_a = I_a c_o \Omega \Phi; \quad M = \frac{p_{\text{мех}}}{\Omega} = I_a c_o \Phi.$$

При постоянном токе возбуждения в компенсированной машине поток Φ можно считать постоянным.

Следовательно, момент машины прямо пропорционален току якоря. Тогда

$$(M + \Delta M)n = (I_a + \Delta I_a)c_o n \Phi;$$

$$Mn + \Delta Mn = I_a c_o n \Phi + \Delta I_a c_o n \Phi$$

После преобразований получаем

$$\Delta Mn = \Delta I_a c_o n \Phi; \Delta p_{\text{мех}} = \Delta I_a c_o n \Phi.$$

Выводы. В силу того, что любое изменение величины передаваемого момента от электродвигателя до исполнительного органа машины изменяет электрические параметры электрической машины, фиксация и оценка изменения электрических параметров электродвигателя могут служить основополагающими для оценки состояния не только самого электродвигателя, но и механической части машины и могут быть использованы для комплексной диагностики сразу всей машины.

УДК 621.01

В.В. Гаряшин, Л.Т. Дворников

Сибирский государственный индустриальный университет

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМА ДВУХЩЕКОВОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Снижение энергетических затрат на измельчение материала, повышение степени его дробления за одну операцию являются актуальными задачами. Одним из вариантов решения этих задач является создание новых кинематических схем дробильных машин.

На рис. 1 показана кинематическая схема двухщековой дробильной машины¹, включающей неподвижную щеку 9, основную 6 и дополнительную 5 подвижные щеки, соединенные в шарнир, приводной кривошип 1, трехпарное опорное звено 4, стойку 8. При этом основная 6 и промежуточная 5 подвижные щеки дробильной машины, трехпарное опорное звено 4, поводки 7 и 3, а также трехшарнирный шатун 2 образуют между собой шестизвенный замкнутый изменяемый контур.

Первой и исключительно сложной задачей при реальном проектировании такой машины является задача по определению геометрических размеров ее звеньев и расположению опор в пространстве, при которых будет обеспечиваться требуемое движение подвижных щек.

Механизм исследуемой дробильной машины состоит из шестизвенной группы Асура. Для решения задачи

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Инжелевская О.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 42 – 45.
2. Савельев А.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 12. С. 53 – 58.
3. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
4. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования. Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.
5. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
6. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
7. Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Кн. 3.: Справочник в 7-ми книгах. – М.: Машиностроение, 2004. – 375 с.
8. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Учебник для ВУЗов. – М.: Энергия, 1980. – 929 с.

© 2012 г. А.Н. Савельев, М.В. Кипервассер,
Д.С. Аниканов

Поступила 16 октября 2012 г.

геометрического синтеза в первом приближении необходимо разбить этот механизм на более простые группы звеньев. Предположим, что точки *H* и *B* движутся по дугам окружностей с центрами *O'* и *O''* соответственно

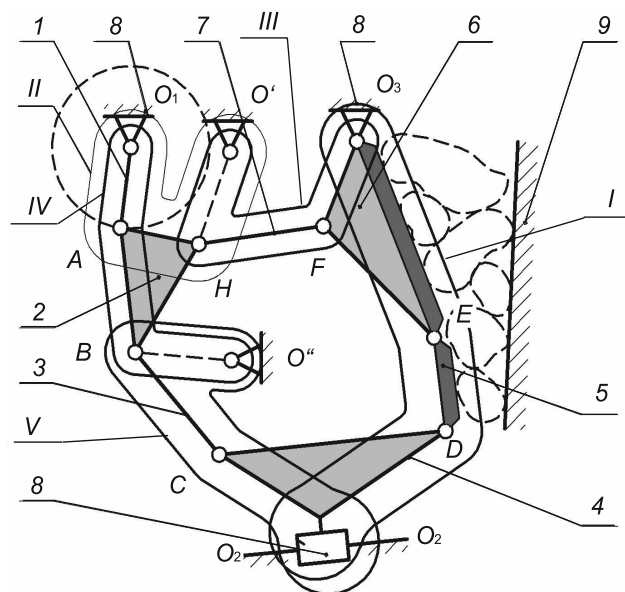


Рис. 1. Схема двухщековой дробилки с шестисторонним замкнутым изменяемым контуром

¹ Пат. 2423179 С1 РФ. МПК В02С 1/02. Двухщековая дробильная машина / Л.Т. Дворников, А.В. Макаров, В.В. Гаряшин, Д.О. Чашников. № 2010107717/21. Заявл. 02.03.2010; опубл. 10.07.2011.