

## МУФТА СВОБОДНОГО ХОДА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО УГЛОВЫМ СКОРОСТЯМ ВЕДУЩЕЙ И ВЕДОМОЙ ПОЛУМУФТ

к.т.н. <sup>1</sup>Грибков Ю.А., к.т.н. <sup>1</sup>Цереня А.А., <sup>1</sup>Шапилевич С.С.,  
д.т.н. <sup>2</sup>Амельченко П.А., н.с. <sup>2</sup>Жуковский И.Н.

<sup>1</sup>УО «Военная академия Республики Беларусь», Минск

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН РБ, Минск

Энергетические средства предназначены для бесперебойного и надежного снабжения электроэнергией. Постоянно повышаются требования к надежности электроснабжения, определяющейся способностью источников обеспечить выдачу необходимого количества электроэнергии при соответствующем ее качестве. Высокое качество электроэнергии достигается применением устройств, обеспечивающих автоматическую регулировку и стабилизацию величины напряжения и частоты источников электропитания.

Дизельная электростанция представляет собой стационарный или передвижной источник электроэнергии, в котором для привода электрического генератора используют дизельный двигатель. Находит применение во многих отраслях народного хозяйства, на объектах Министерства по чрезвычайным ситуациям, Министерства обороны и т. д. Они могут быть основным источником электроэнергии или резервным.

Момент сопротивления генератора зависит в том числе от количества включенных в электрическую цепь осветительных приборов, сварочных мест, причем обстановка в электросети может постоянно меняться. Муфта свободного хода (МСХ), включенная в привод генератора от дизельного двигателя, должна вовремя реагировать на эти изменения нагрузки, своевременно включаясь и выключаясь, соединяя двигатель с генератором или отсоединяя его. В связи с ростом мощностей, скоростей и надежности современных машин и механизмов требования к МСХ ужесточаются.

В настоящее время на дизельных электростанциях широко применяют МСХ с цилиндрическими роликами, но они имеют серьезный недостаток – склонность к пробуксовке. Это связано с трудностью создания и поддержания при эксплуатации достаточного запаса сцепления. Этот недостаток устраняется рычажно-фрикционными механизмами – роликовые МСХ теряют работоспособность при износе рабочих поверхностей, составляющем сотые доли миллиметра, а в рычажно-фрикционных механизмах износ даже до нескольких миллиметров никак не повлияет на работоспособность МСХ [1].

Кулачково-зубчатая муфта свободного хода (КЗМСХ) разработана, испытана и внедрена в начале 70-х годов доцентом Белорусского политехнического института Николаем Васильевичем Зубом [2]. Ее можно использовать в тяжело нагруженных и высокоскоростных приводах с нестабильным нагрузочным и скоростным режимами работы, где роликовые МСХ не обеспечивают необходимой надежности. Эти муфты нашли применение в оборонной промышленности [3].

Конструкция КЗМСХ основана на рычажно-планетарном принципе сцепления и расцепления. Ее заклинивающие элементы зажимаются не между полумуфтами, а между одной из них и опорным звеном, в котором эти элементы свободно размещены. С одной полумуфтой заклинивающие элементы зацепляются и управляются ею, а с другой в замкнутом состоянии имеют фрикционную связь. На рисунке представлена конструктивно-кинематическая схема привода электрогенератора и вертикальный разрез МСХ.

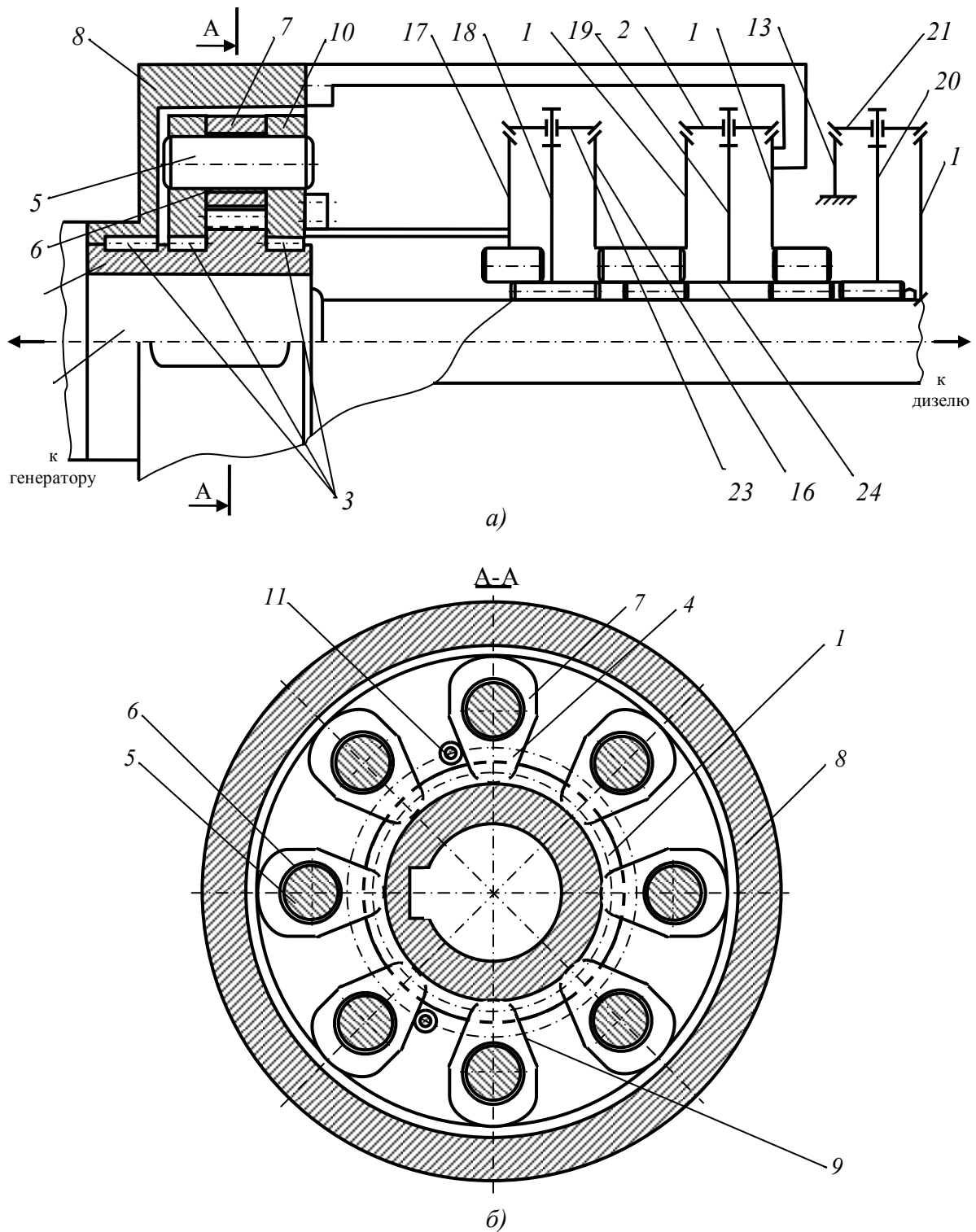


Рис. 1. Конструктивно-кинематическая схема привода электрогенератора (а) и вертикальный разрез муфты свободного хода (б)

1 – ведущая полумуфта в виде звездочки; 2 – ведущий вал; 3 – подшипники МСХ; 4 – рабочая часть кулачка, участвующая в соединении кулачка со звездочкой; 5 – опорная ось кулачка; 6 – втулка оси кулачка; 7 – кулачок; 8 – обойма с гладкой внутренней поверхностью с ведомой полумуфтой; 9 – упорная часть кулачка, участвующая в остановке при упоре в штифт; 10 – сепаратор; 11 – упорный штифт; 12, 13, 14, 15, 16, 17 – центральные конические колеса дифференциалов (числа зубьев колес  $Z_{12} = Z_{13} = Z_{14} = Z_{15} = Z_{16} = Z_{17}$ ); 18, 19, 20 – водила дифференциалов; 21, 22, 23 – сателлиты дифференциалов ( $Z_{21} = Z_{22} = Z_{23}$ ); 24 – общая втулка крепления водил

Принцип работы муфты следующий. При повороте ведущей полумуфты в виде звездочки 1 относительно обоймы 8 по часовой стрелке (со стороны дизельного двигателя) сепаратор 10 удерживается от совместного поворота моментом сил инерции и сил трения на внешних торцах дисков сепаратора 10, а кулачки 7 благодаря зацеплению со звездочкой 1 поворачиваются против часовой стрелки. Их эксцентричные поверхности касаются обоймы 8, и в месте контактов возникают как нормальные силы, так и силы трения.

Под действием сил трения и окружных сил в зацеплении 4 кулачков со звездочкой 1 происходит движение всей системы муфты до полного заклинивания. С этого момента муфта вращается как одно целое.

Расклинивание осуществляется под воздействием нормальной силы при обратном относительном повороте обоймы 8 и звездочки 1, то есть при обгоне. При этом до исчезновения упругих деформаций движение звеньев происходит в сторону, противоположную заклиниванию. Как только кулачок 7 коснется упора штифтом 11, дальнейшее движение сепаратора 10 относительно звездочки 1 прекращается, и кулачки 7 удерживаются в нейтральном положении с зазором относительно обоймы 8.

Свободный ход будет осуществляться без изнашивания рабочих поверхностей кулачков 7 и обоймы 8 с любой угловой скоростью. При включении обратной связи эта скорость будет строго определенной, что будет показано ниже.

Относительный поворот сепаратора 10 против часовой стрелки приводит к включению КЗМСХ, а поворот сепаратора 10 по часовой стрелке – к выключению КЗМСХ (размыканию). Данное обстоятельство и использовано для улучшения работы КЗМСХ.

Основным достоинством КЗМСХ является устранение контакта звеньев при свободном ходе. Однако это приводит к некоторой неопределенности поведения звеньев заклинивания [4]. Например, если угловая скорость  $\omega_8$  ведомой полумуфты 8 снизится и станет ниже угловой скорости  $\omega_1$  ведущей полумуфты 1, муфта КЗМСХ может не заклиниваться при условии постоянства  $\omega_1$ . Устранить этот недостаток предлагалось ранее с помощью планетарного механизма и плунжерного поджима [5]. Однако плунжерный поджим не обеспечивает стабильную работу МСХ.

Подробное исследование КЗМСХ с применением ЭВМ [6] показало, что время задержки включения муфты зависит от момента трения собственно фрикционного механизма, координаты центра тяжести кулачка 7, момента трения между кулачком 7 и его осью 5, толщины масляного слоя между кулачками 7 и обоймой 8.

Для уменьшения влияния на работу КЗМСХ различных факторов предлагается введение кинематической обратной связи, непосредственно воздействующей на поворот сепаратора 10 в ту или другую сторону относительно звездочки 1, тем самым способствуя включению муфты в необходимый момент времени.

На рисунке показаны два потока энергии: силовой, то есть «вал 2 – звездочка 1 – кулачки 7 – ведомая полумуфта 8» и кинематический – «вал 2 – шестерня 12 – три симметричных конических дифференциала – сепаратор 10». Рассмотрим подробно работу всего механизма вместе с кинетической обратной связью (кинематическим потоком энергии).

Центральное коническое колесо 12 первого от двигателя внутреннего сгорания дифференциала жестко соединено с валом 2 шпонкой. Второе колесо 13 жестко закреплено, например, на кронштейне, установленном на общей плите дизеля и генератора. Водило 20 закреплено на втулке 24, которая установлена на подшипниках на валу 2. Центральное колесо 14 второго дифференциала установлено на подшипнике на втулке 24 и жестко соединено с ведомой полумуфтой МСХ 8, к которой подсоединен вал ротора электрогенератора. Колеса 15, 16 второго и третьего дифференциалов образуют блок, который находится на подшипнике на втулке 24. Водила 19, 18 второго и третьего дифференциалов жестко установлены на втулке 24. Второе колесо 17 третьего диф-

ференциала расположено на подшипнике на втулке 24 и жестко соединено с сепаратором 10 МСХ.

Считаем, что вал 2 вращается по часовой стрелке с угловой скоростью  $\omega_2 = \omega_1 = \omega_{12}$ .

По формуле Виллиса [7] вычисляем угловую скорость  $\omega_{20} = \omega_{24} = \omega_{19} = \omega_{18}$ :

$$i_{12,13}^{20} = (\omega_{12} - \omega_{20}) / (\omega_{13} - \omega_{20}) = -1, \quad (1)$$

где  $i_{12,13}^{20}$  – передаточное отношение от звена 12 к звену 13 при остановленном водиле 20.

Подставив в формулу (1) известное значение угловой скорости  $\omega_{13} = 0$ , получим:

$$\omega_{20} = \omega_{24} = \omega_{19} = \omega_{18} = \omega_{12} / 2 = \omega_1 / 2 = \omega_2 / 2.$$

Угловая скорость  $\omega_8 = \omega_{14}$  известна. Для второго дифференциала запишем формулу Виллиса и найдем скорость  $\omega_{15} = \omega_{16}$ :

$$i_{14,15}^{19} = (\omega_{14} - \omega_{19}) / (\omega_{15} - \omega_{19}) = -1. \quad (2)$$

Подставив в эту формулу известные значения  $\omega_8 = \omega_{14}$  и  $\omega_{19} = \omega_1 / 2$ , найдем  $\omega_{15} = \omega_{16}$ :

$$\omega_{15} = \omega_{16} = \omega_1 - \omega_8.$$

В третьем дифференциале  $\omega_{17} = \omega_{10}$  и  $\omega_{16} = \omega_{15}$ . Здесь формула Виллиса имеет вид:

$$i_{16,17}^{18} = (\omega_{16} - \omega_{18}) / (\omega_{17} - \omega_{18}) = -1. \quad (3)$$

Поскольку  $\omega_{16} = \omega_{15} = \omega_1 - \omega_8$  это разность между угловыми скоростями ведущей и ведомой полумуфт. Если  $\omega_1 > \omega_8$ , то МСХ замыкается, а если  $\omega_1 < \omega_8$ , то МСХ размыкается.

Находим угловую скорость, которая будет обеспечена сепаратору 10:

$$(\omega_{16} - \omega_1 / 2) / (\omega_{17} - \omega_1 / 2) = -1.$$

В итоге получаем:

$$-\omega_{17} + \omega_1 / 2 = \omega_{16} - \omega_1 / 2,$$

откуда

$$\omega_{17} = \omega_{10} = \omega_1 - \omega_{16} = \omega_1 - (\omega_1 - \omega_8). \quad (4)$$

При  $(\omega_1 - \omega_8) > 0$  из (4) следует, что  $\omega_{17} = \omega_{10}$  становится меньше  $\omega_1$ , то есть сепаратор 10 отстает от звездочки 1. Это равносильно его повороту против часовой стрелки относительно звездочки 1. Происходит замыкание МСХ. И наоборот, при  $(\omega_1 - \omega_8) < 0$  МСХ размыкается.

Бурное развитие электроники позволило российским ученым и инженерам разработать вместо традиционной вальной дизель-генераторной энергоустановки разработать свободнопоршневую дизель-генераторную установку возвратно-поступательного действия [8]. Возвратно-поступательное движение поршней, установленных оппозитно и соединенных штоком, преобразуется в электрическую энергию линейным генератором. Силовые межагрегатные и управляющие механические связи заменены информационными, реализуемые микроконтроллером.

В [8] подробно описана работа этих дизельных электростанций. Дизели в них работают только на двухтактном цикле, для продувки цилиндров требуются дополнительные устройства. Уплотнение штоков представляет собой не простую техническую

задачу, так как температура в цилиндрах составляет 1800–2200 К. Работой дизеля управляет электроника. При этом необходимо управлять длительностью прохождения поршнем участка рабочего хода, моментом прохождения поршнем контрольной точки рабочего хода на каждом цилиндре. Для регулирования степени сжатия нужно управлять моментом воспламенения топлива индивидуально в каждом цилиндре, электромагнитными силами на якоре линейного электрического генератора для оптимизации расхода топлива.

Как видим, электронная система этих установок довольно многоплановая, тем более что каждый блок (два цилиндра – шток) оснащен электроникой индивидуально. Такие дизель-генераторные установки должны обслуживаться высококвалифицированными инженерами или оснащаться системой диагностики. Видимо, такими дизельными электростанциями будут оборудоваться объекты, требующие больших мощностей. Тогда, по-видимому, от них будет получен весомый экономический эффект за счет отказа от шатунов, коленчатых валов, маховиков, приводов клапанов и, как указывается в статье [8], за счет снижения удельного расхода топлива на 2,5–7,3 г/кВт·час.

Мы ставили более простую задачу: сравнить угловые скорости полумуфт 1 и 8, а затем обеспечить или включение или выключение МСХ, пользуясь выражением (4) с помощью электроники. Ее можно решать несколькими путями: аналоговым и цифровым. Рассмотрим только «цифровой» путь.

Итак, на полумуфтах 1 и 8 или на соединенных с ними валах установим роторы типа зубчатки и приблизим к ним закрепленные на стойке датчики Холла, содержащие постоянный магнит, элемент Холла, операционный усилитель, формирователь импульсов, выходной каскад и блок стабилизации. Сигналы от датчиков Холла обрабатываются микропроцессором, который на выходе обеспечивает необходимые условия для включения-выключения исполнительного устройства, например, в виде электродвигателя согласно выражению (4).

Так, если  $\omega_1 = \omega_8$ , то электродвигатель отключается от электроэнергии с помощью реле, и его ротор все равно вращается вместе с сепаратором 10, жестко соединенным с ротором электродвигателя.

Если  $\omega_1 > \omega_8$ , то ротор электродвигателя повернет сепаратор 10 против часовой стрелки, и МСХ включится, а если  $\omega_1 < \omega_8$ , то ротор электродвигателя повернет сепаратор по часовой стрелке, и МСХ выключится.

Несмотря на кажущуюся простоту обеспечения обратной связи с помощью электроники, на данном этапе эта задача неразрешима. Причина в следующем. Как видно из рисунка, электродвигатель должен быть выполнен «на проход» вала 2. То есть ротор должен быть пустотелым. Конечно, такие электродвигатели существуют, тем более что здесь подошел бы электродвигатель 0,75 кВт.

Однако на данном этапе решение проблемы управления муфтой свободного хода Н. В. Зуба можно осуществлять с помощью дифференциалов, как и описано в статье.

### **Выводы:**

Кинематический ряд (обратная связь) из трех симметричных конических дифференциалов, включенных параллельно силовому ряду дизельному двигателю внутреннего сгорания, МСХ Н. В. Зуба, электрогенератору, позволяет:

- увеличить надежность работы МСХ;
- устранить на некоторых режимах неопределенность при замыкании-размыкании МСХ;
- увеличить быстродействие МСХ и независимость быстродействия от коэффициента трения, момента трения, наличия смазки между кулачками и ведомой полумуфтой и от других факторов;

устранить действие ударной нагрузки при включении МСХ;  
увеличить точность срабатывания МСХ и синхронную работу МСХ и кинематического ряда;

изготавливать элементы кинематического ряда и всех его соединений с МСХ из легких материалов, например, из дюралюминия;

экономить дизельное топливо за счет четкой работы системы обратной связи с работой регулятора дизельного двигателя внутреннего сгорания;

обеспечить независимость от мощности дизельной электростанции параметров кинематического ряда (обратной связи);

обеспечить обратную связь на данном этапе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов, А. И. *Бесступенчатые рычажно-фрикционные передачи* / А. И. Леонов, Н. П. Ефимов. – М.: Машиностроение, 1987. – 136 с.
2. *Муфта: авт. свидет. 396483 СССР, М. Кл. F16d43/18* / Н. В. Зуб; заявитель Белор. политех. инст-т. – № 1728221/25-27; заявл. 23.12.1971; опубл. 29.08.1973 // Бюл. изобр./ Гос. комит. по делам изобр. и отквр. СМ СССР. – 1973. – № 36.
3. Скойбеда, А. Т. *Детали машин и основы конструирования* / А. Т. Скойбеда, А. В. Кузьмин, Н. Н. Макейчик; под ред. А. Т. Скойбеда. – Минск: Выш. шк., 2000. – 584 с.
4. Леонов, А. И. *Микрохроновые механизмы свободного хода* / А. И. Леонов. – М.: Машиностроение, 1982. – 219 с.
5. *Муфта: пат. 8593 Респ. Беларусь, МПК F16D43/18, 41/07* / А. А. Цереня, Ю. А. Грибков, С. С. Шапелевич, И. В. Каноник; заявитель Воен. акад. Респ. Беларусь. – № а 20020569; заявл. 02.07.2002; опубл. 30.10.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 5.
6. Поздеев, Е. В. *Динамика заклинивания обгонной муфты* / Е. В. Поздеев, А. Я. Котлобай, Г. Ф. Бутусов // Сб. науч. тр. / БПИ. – Минск, 1988. – Вып. 3: Конструирование и эксплуатация автомобилей и тракторов. – С. 59-64.
7. Артоболевский, И. И. *Теория механизмов и машин* / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
8. Пинский, Ф. И. *Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами* / Ф. И. Пинский // Мобильная техника. – 2004. – № 1. – С. 13-17.

**E-mail:** [grb60@mail.ru](mailto:grb60@mail.ru)

Поступила в редакцию 10.09.2016