

# 1. Введение

Для начала немного теории.

## 1.1 Определения:

**Механический редуктор** — устройство, в котором частота вращения входного вала преобразуется в меньшую частоту на выходном валу.

В противоположность редуктору,

**Мультипликатор** — устройство, у которого частота вращения выходного вала, больше, чем у входного.

Как редуктор, так и мультипликатор характеризуются передаточным числом.

**Передаточное число** — отношение скорости вращения входного вала к скорости выходного. Обозначается буквой  $i$

$$i = \frac{\omega_{\text{вх}}}{\omega_{\text{вых}}}$$

Для редуктора  $i$  больше 1, для мультипликатора — меньше.

Передаваемая мощность при вращательном движении:

$$P = \omega \cdot M$$

где

$M$  — момент ( $H \times m$ ),

$\omega$  — угловая скорость вращения (радиан / сек).

Если пренебречь потерями в механизме, то мощность на входе будет такая же, как и на выходе:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}} \text{ или } \omega_{\text{вх}} \cdot M_{\text{вх}} = \omega_{\text{вых}} \cdot M_{\text{вых}}$$

отсюда

$$\frac{\omega_{\text{вх}}}{\omega_{\text{вых}}} = \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}}$$

То есть, во сколько раз понизилась (повысилась) частота на выходе из редуктора (мультипликатора), во столько же возрос (уменьшился) момент на выходном валу. Это свойство позволяет, например, увеличить тягу, но за счет кратного уменьшения скорости.

Конструктивно простейший редуктор представляет из себя две сцепленные между собой зубчатые шестерни разного диаметра. Передаточное отношение такого редуктора можно посчитать как отношение количества зубьев шестерен:

$$i = \frac{Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}}$$

где  $Z_{\text{вых}}$  и  $Z_{\text{вх}}$  — количество зубьев шестерен на выходном и входном валу.

Пусть у механической передачи имеются вал 1 и вал 2. Передаточное число при подводе мощности к валу 1 и снятии с вала 2 обозначим  $i_{12}$ . Если же мощность подводить к валу 2, а снимать ее с вала 1, то передаточное число такого механизма:

$$i_{21} = \frac{1}{i_{12}}$$

Передаточное число двух последовательно соединенных передач с передаточными числами  $i_1$  и  $i_2$ :

$$i = i_1 \cdot i_2$$

## 1.2. Планетарная передача

**Планетарная передача** — фрикционный или зубчатый механизм, в котором *ось хотя бы одного колеса подвижна*.

Одна из разновидностей планетарной передачи представлена на рисунке 1.

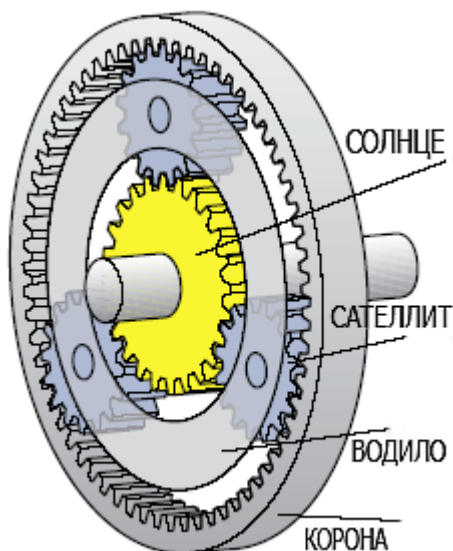


Рисунок 1. Планетарная передача

Элементами с подвижной осью являются сателлиты. Корону также называют кольцевой шестерней. Применение планетарных передач обусловлено следующими их преимуществами:

а) компактность;  
б) высокий КПД;  
в) возможность передачи большего крутящего момента по сравнению с обычными механизмами, так как зацепление шестерен происходит в нескольких точках одновременно (на рис. 1 — в трех);

г) возможность получать различные передаточные отношения, комбинируя входные и выходные элементы. Передача момента может происходить, например: от солнца к короне, от солнца к водилу, от водила к солнцу, и в разных других вариантах. В восьмискоростных планетарках Шимано используются планетарные передачи с зафиксированным солнцем, где момент передается между короной и водилом или в противоположном направлении.

Иногда сателлиты имеют не один, а два зубчатых венца с разным количеством зубьев, где один венец сцеплен с солнечной шестерней, а второй — с короной.

## 1.3. Передаточное число планетарной передачи

Найдем передаточное число планетарной передачи с двухвенцовыми сателлитами, когда входным элементом является корона, выходным — водило, а солнце неподвижно.

Сначала рассмотрим движение шестерен относительно водила. На рис. 2 стрелками обозначены направления вращения элементов передачи.

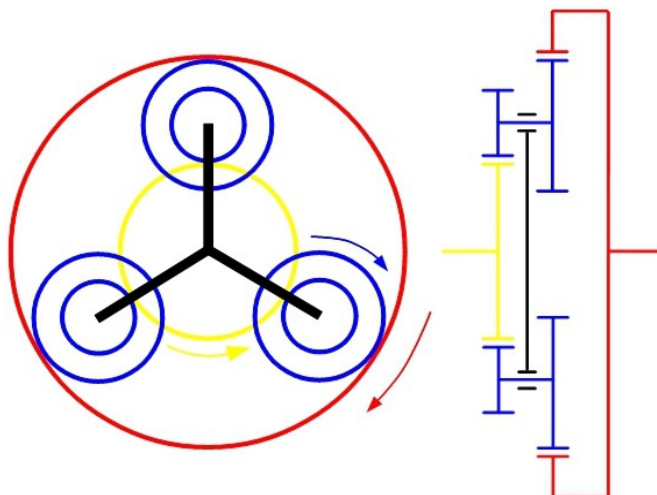


Рисунок 2. Схема направлений вращения планетарного механизма.

Пусть солнечная шестерня вращается против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega_C$ . Тогда скорость вращения сателлитов  $\omega_S$ :

$$\omega_S = -\omega_C \cdot \frac{Z_C}{Z_{SC}}$$

где  $Z_C$  - количество зубьев солнца;  $Z_{SC}$  - количество зубьев венца сателлита, сцепленного с солнечной шестерней.

Знак минус в правой части формулы означает, что сателлит вращается противоположно солнцу.

Скорость вращения короны:

$$\omega_K = \omega_S \cdot \frac{Z_{SK}}{Z_K} = -\omega_C \cdot \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K} \quad (1)$$

$Z_{SK}$  - количество зубьев венца сателлита, сцепленного с короной

$Z_K$  - количество зубьев короны.

Теперь перейдем к неподвижной системе отсчета. Пусть относительно неподвижной системы водило вращается по часовой стрелке со скоростью  $\omega_B$ . Тогда угловая скорость короны будет складываться из скорости вращения водила и скорости вращения самой короны относительно водила (выражение 1):

$$\omega_K = \omega_B + \left( -\omega_C \cdot \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K} \right) \quad (2)$$

Если скорость вращения солнца равна нулю в неподвижной системе отсчета (солнце зафиксировано), то относительно водила солнце вращается со скоростью водила, но в противоположном ему направлении:

$$\omega_S = -\omega_B$$

Подставляя это значение угловой скорости в выражение 2, получим:

$$\omega_K = \omega_B + \omega_B \cdot \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K} = \omega_B \cdot \left( 1 + \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K} \right)$$

Отсюда, передаточное число планетарной передачи с зафиксированным солнцем от короны к водилу:

$$i_{KB} = \frac{\omega_K}{\omega_B} = 1 + \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K} \quad (3)$$

Если сателлит имеет не два венца, а один, то  $Z_{SK} = Z_{SC}$  и выражение 3 принимает вид:

$$i_{KB} = 1 + \frac{Z_C}{Z_K} \quad (4)$$

Из анализа формул 3 и 4 можно сделать выводы:

1. Передаточное отношение передачи с зафиксированным солнцем от короны к водилу всегда больше 1 (т. к. отношение числа зубьев шестерен всегда больше нуля), а это значит, что передача является редуктором.

2. Т.к. количество зубьев солнца не может быть больше, чем у короны, то выражение 4 всегда меньше двух. На практике диапазон передаточных чисел передачи с одновенцовым сателлитом находится в пределах 1,13-1,5.

3. За счет применения двухвенцовых сателлитов диапазон значений  $i_{KB}$  может быть значительно расширен.

4. При том же передаточном отношении механизм с двухвенцовыми сателлитами будет меньше по диаметру. Применение такого механизма в велосипедной втулке позволит сделать ее более компактной.

Найдем передаточное отношение передачи с зафиксированным солнцем при передаче момента от водила к короне:

$$i_{BK} = \frac{1}{i_{KB}} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{SK}}{Z_{SC}} \cdot \frac{Z_C}{Z_K}}$$

Проанализируем:

1.  $i_{BK}$  всегда меньше 1, значит, такая передача — мультипликатор.

2. Чем больше количество зубьев солнца  $Z_C$ , тем меньше  $i_{BK}$ , и тем больше возрастает частота выходного звена (короны)

3. Аналогично,  $i_{BK}$  уменьшается при уменьшении количества зубьев  $Z_{SC}$  венца сателлита, сцепленного с солнцем. Причем, чем больше  $Z_C$ , тем меньше  $Z_{SC}$ , ведь эти шестерни взаимосвязаны — если увеличивается, одна из них, то уменьшается вторая.

Меняя  $Z_C$  и  $Z_{SC}$ , можно получать различные частоты выходного звена при неизменной частоте входного.

## 2. Работа шимановской восьмерки

### 2.1. Упрощенная схема втулки

Теперь перейдем к практической реализации, которая заложена в семействе втулок Shimano Nexus Inter 8 и Shimano Alfine 8. На рис 3 представлена упрощенная схема устройства таких втулок. Указаны только те элементы, которые непосредственно участвуют в передаче крутящего момента. Одинаковым цветом обозначены элементы, которые вращаются как единое целое.

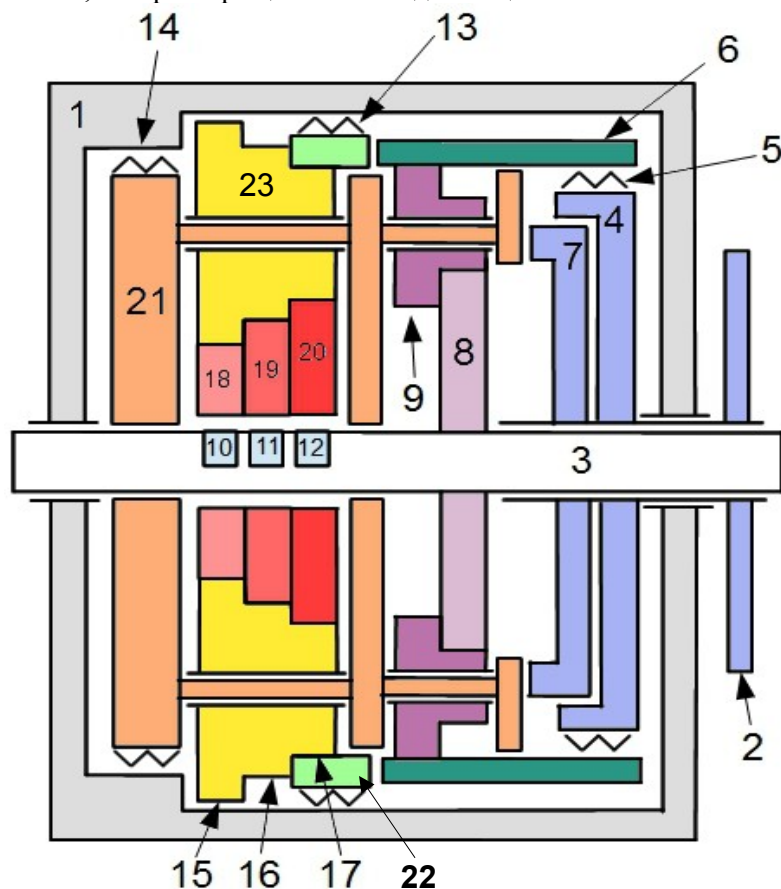


Рисунок 3. Схема восьмискоростной втулки Шимано.

На схеме цифрами обозначены:

- 1 — корпус втулки
- 2 — ведомая звездочка цепной передачи
- 3 — вал втулки
- 4 — ведущее колесо
- 5 — входная обгонная муфта
- 6 — корпус входной планетарной передачи (он же коронная шестерня)
- 7 — сцепление
- 8 — солнечная шестерня входной планетарной передачи
- 9 — двухвенцовый сателлит
- 10, 11, 12 — собачки переключения передач
- 13 — обгонная муфта короны выходной планетарной передачи
- 14 — обгонная муфта водила выходной передачи
- 15, 16, 17 — венцы сателлита
- 18, 19, 20 — солнечные шестерни
- 21 — корпус выходной передачи, а также его водило
- 22 — корона выходной передачи
- 23 — сателлит.

Особенности:

1. Звездочка 2, колесо 4 и сцепление 7 вращаются вместе, как единое целое
2. Ось 3 жестко крепится к раме велосипеда гайками, и предохраняется от проворачивания специальным фиксирующими шайбами (гайки и шайбы на схеме не показаны).
3. Сцепление 7 имеет возможность перемещаться влево и входит в зацепление с водилом 21.
4. Солнечная шестерня 8 жестко закреплена на оси 3.

5. Обгонные муфты 5 и 14 втулок Alfine и некоторых версий Nexus выполнены на роликах. В остальных модификациях втулок — на трещотках. Муфта 13 всегда роликовая.

6. Собачки 10, 11, 12 при работе механизма переключения поднимаются из вала 3 не жестко, а под действием пружин, и при надавливании на них вниз легко заходят обратно в свои пазы.

7. Сателлиты 23 в Nexus вращаются на подшипниках скольжения, в Alfine — на игольчатых подшипниках.

## 2.2. Устройство обгонных муфт

Роликовая обгонная муфта устроена следующим образом:

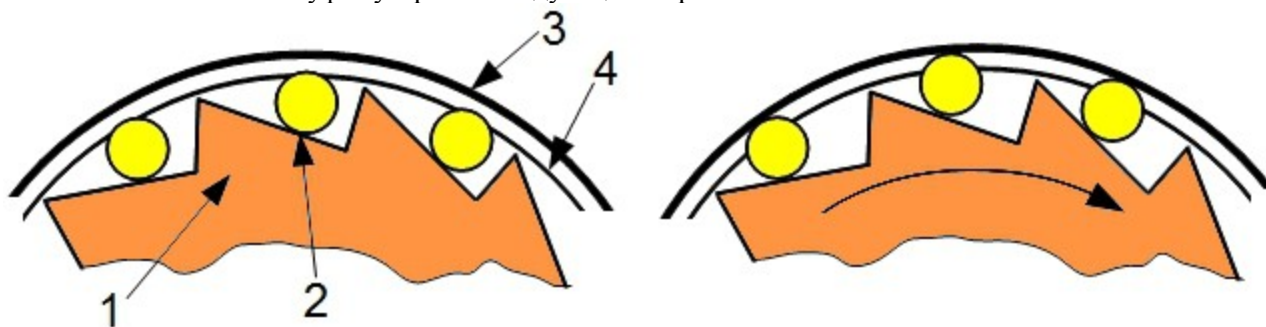


Рисунок 4а

Рисунок 4б

- 1 — ведущая часть
- 2 — ролики
- 3 — ведомая часть
- 4 — сепаратор

Ролики, равномерно распределенные по окружности муфты сепаратором, лежат на поверхностях переменного радиуса (клиньях) ведущей части.

**Режим передачи момента:** если ведущая часть вращается быстрее ведомой (рис. 4б), ролики смещаются влево, одновременно передвигаясь по наклонным поверхностям от центра, до тех пор, пока не упрутся в ведомую часть муфты. В этот момент муфта заклинивается, ведущая и ведомая часть вращаются как единое целое.

**Свободный ход:** если ведомая часть вращается быстрее ведущей, ролики смещаются вправо, разъединяя ведущую и ведомую часть, происходит расцепление муфты (рис. 4а).

В трещоточном механизме в роли элементов зацепления выступают подпружиненные собачки и зубцы на ведомой части.



В отличие от трещоточного механизма, роликовая обгонная муфта бесшумна.

## 2.3. Соответствие элементов упрощенной схемы реальной втулке

Соответствие элементов, обозначенных на рис.3, деталям реальной втулки, показаны на рис. 4.

Цифровые обозначения на обоих рисунках одинаковы.



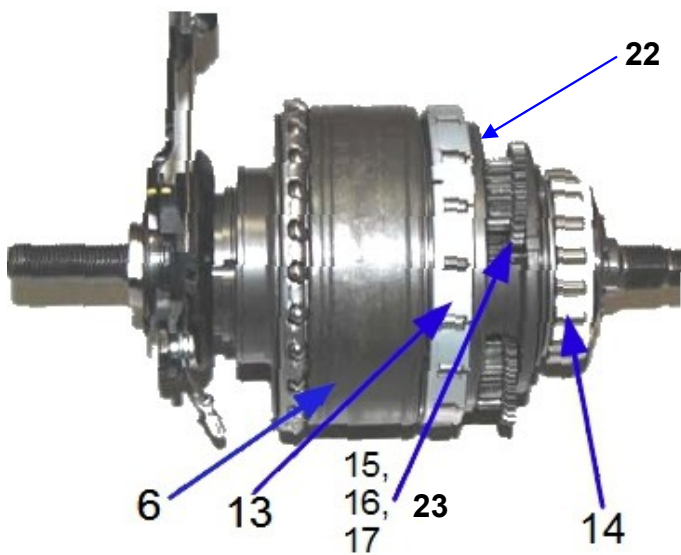


Рисунок 4а

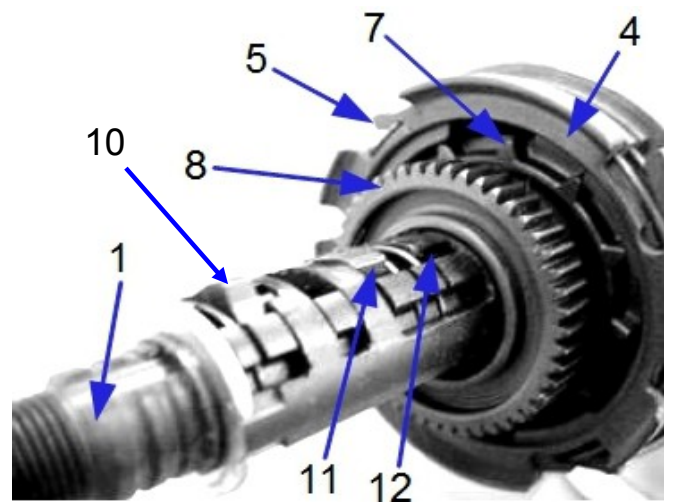


Рисунок 4б

Примечание: на рис. 4б представлен механизм втулки Nexus (элемент 5 – собачка трещоточной обгонной муфты).

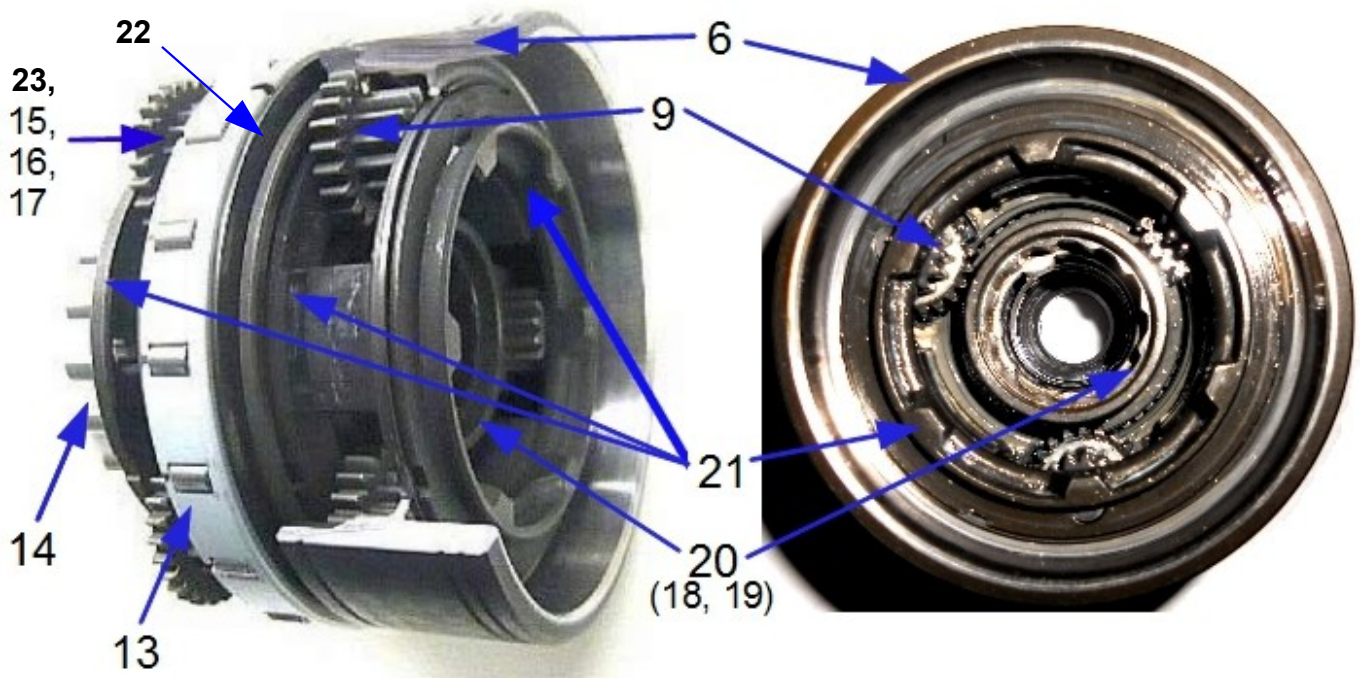


Рисунок 4в

## 2.4. Переключение передач

### 2.4.1. Передача 1

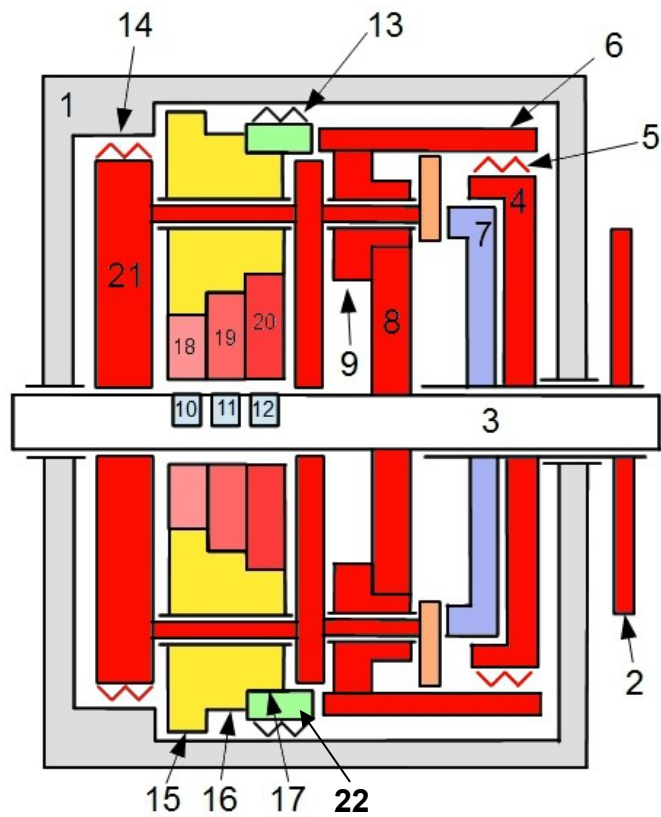


Рисунок 5. Первая передача

Элементы втулки, участвующие в передаче момента вращения, обозначены на рис.5 и далее красным цветом.

Момент вращения цепной передачи поступает от звездочки 2 на колесо 4. При вращении колеса 4 (по часовой стрелке, если смотреть с правой стороны втулки) обгонная муфта 5 входит в зацепление с корпусом входного редуктора (короной) 6. От короны момент передается на водилу 21. Такая передача, от короны к водилу, как было показано в разделе 1.3, является понижающей (редуктором). Частота вращения водила 21 меньше, чем короны 6.

Трос переключения скоростей от манетки полностью отпущен, собачки 10, 11, 12 утоплены, и шестерни 18, 19, 20 в работе не участвуют.

При вращении корпуса 21 муфта 14 сцепляется с корпусом втулки 1, и момент педалирования, преобразованный в сторону увеличения в число раз  $i_P$  (передаточное отношение входного редуктора), передается колесу велосипеда.

#### 2.4.2. Передача 2

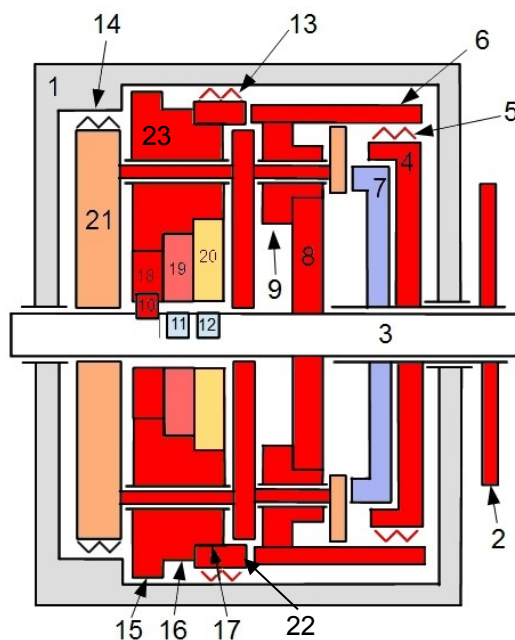


Рисунок 6. Вторая передача.



Момент вращения в редукторном блоке передается аналогично передаче 1.

При переключении передачи на манетке на одну позицию вверх, поднимается собачка 10. Водило 21, вращаясь по часовой стрелке, увлекает за собой сателлиты мультипликаторного блока, а следом за ними и солнечные шестерни 18, 19, 20. С правой стороны втулки ось 3, собачка 10 и шестерня 18 выглядят, как показано на рис. 7.

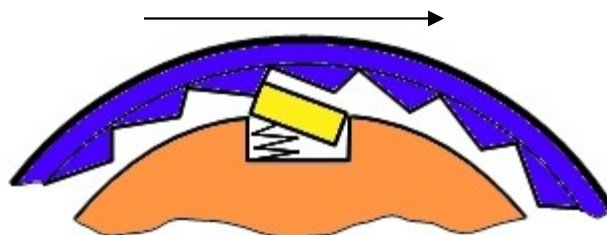


Рисунок 7. Зацепление собачки с солнечной шестерней мультипликатора.

При вращении солнечной шестерни 18 по часовой стрелке зубец на ее внутренней поверхности упирается в собачку 10, и шестерня 18 останавливается. С этого момента комбинация солнце 18, венец сателлита 15, водило 21 и корона 22 работают как мультипликатор с зафиксированным солнцем (см. раздел 1.3). Момент вращения передается от водила 21 к короне 22. Скорость вращения короны выше, чем водила, и, соответственно, корпуса втулки 2, который был сцеплен с водилом 21 на первой передаче. Поэтому обгонная муфта 13 входит в зацепление с корпусом втулки 2. Корпус 2 начинает вращаться быстрее корпуса 21, муфта 14 расцепляется.

Передаточное число на второй передаче равно произведению передаточного числа входного редуктора и соответствующей ступени мультипликатора.

### 2.4.3. Третья передача

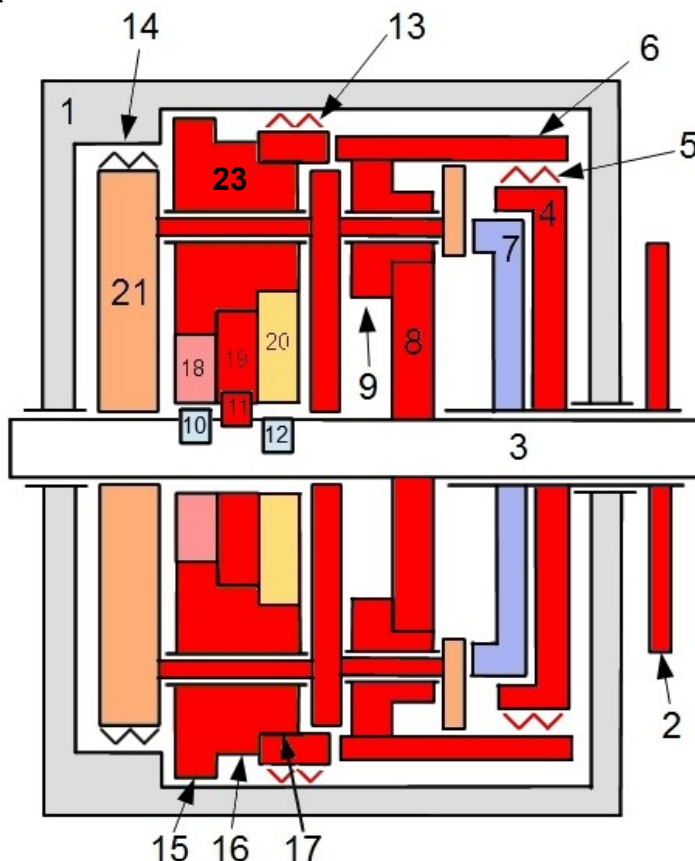


Рисунок 8. Третья передача

Манетка переключается еще на одну позицию вверх, механизм переключения втулки поднимает собачку 11 третьей передачи.

Рассмотрим процесс переключения между ступенями мультипликатора. Для этого сравним скорости вращения шестерен 18 и 19 при включенной передаче 2. Водило 21 вращается по часовой стрелке (если смотреть с правой стороны втулки) со скоростью  $\omega_B$ . Шестерня 18 неподвижна относительно вала 3, а относительно водила вращается со скоростью  $\omega_{C18} = -\omega_B$  (против часовой стрелки).

Скорость вращения сателлита 23:

$$\omega_S = -\omega_{C18} \cdot \frac{Z_{C18}}{Z_{S15}}$$

Здесь и далее индексы параметров формул означают: С — солнце, S- спутник, номер после буквы — позиционное обозначение в соответствии с рис. 8.

Скорость вращения солнца 19 относительно водила:

$$\omega_{C19} = -\omega_S \cdot \frac{Z_{S16}}{Z_{C19}} = \omega_{C18} \cdot \frac{Z_{C18}}{Z_{S15}} \cdot \frac{Z_{S16}}{Z_{C19}} = -\omega_B \cdot \frac{Z_{S16}}{Z_{S15}} \cdot \frac{Z_{C18}}{Z_{C19}}$$

Скорость солнца 19  $\omega_{C19H}$  относительно неподвижной оси 3:

$$\omega_{C19H} = \omega_B + \omega_{C19H} = \omega_B - \omega_B \cdot \frac{Z_{S16}}{Z_{S15}} \cdot \frac{Z_{C18}}{Z_{C19}} = \omega_B \cdot \left(1 - \frac{Z_{S16}}{Z_{S15}} \cdot \frac{Z_{C18}}{Z_{C19}}\right)$$

Отношения  $\frac{Z_{S16}}{Z_{S15}}$  и  $\frac{Z_{C18}}{Z_{C19}}$  меньше 1, т. к.  $Z_{S16} < Z_{S15}$  и  $Z_{C18} < Z_{C19}$ , поэтому  $\omega_{C19H} > 0$ , а это значит, что относительно оси 3 солнце 19 вращается в том же направлении, что и водило 21, то есть по часовой стрелке.

Таким образом, при подъеме собачки третьей передачи 11 произойдет ее зацепление с зубцами солнца 19, ступень мультипликатора включится в работу.

После этого солнце 18 начнет вращаться относительно оси 3 со скоростью:

$$\omega_{C18H} = \omega_B \cdot \left(1 - \frac{Z_{S15}}{Z_{S16}} \cdot \frac{Z_{C19}}{Z_{C18}}\right) < 0$$

т. е. против часовой стрелки. При этом собачка 10 выходит из зацепления с солнцем 18, и опускается, но полностью не убирается в вал 3, а занимает «дежурное» приподнятое положение, предусмотренное конструкцией механизма переключения. Дежурное положение собачки нужно для ускорения переключения вниз с третьей передачи на вторую.

Далее момент вращения передается через венец 17 спутника на корону и далее через муфту 13 на корпус втулки, как и на второй передаче.

Рассмотрим особенности процесса переключения с верхней передачи на нижнюю на примере передач 3 и 2.

Моменты вращения при педалировании и включенной ступени мультипликатора распределены в нем, как показано на рис.9.

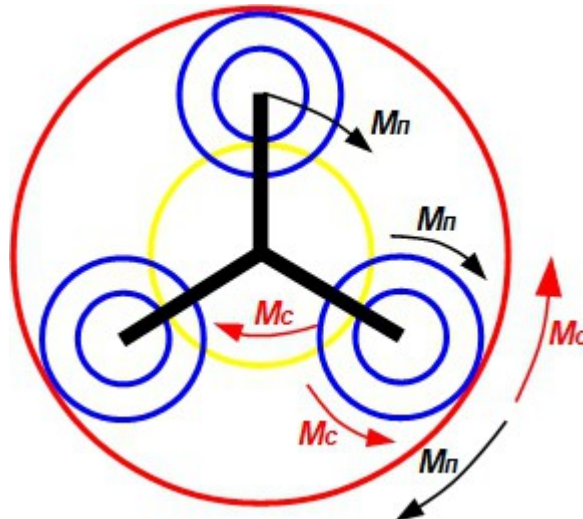


Рисунок 9. Моменты в мультипликаторе.

(по величине моменты на разных шестернях разные, но здесь рассматриваются только их направления)

Момент педалирования  $M_n$  приводит к вращению водила и качению спутников по часовой стрелке, а также, при остановленном солнце, через спутники передается короне. От колеса велосипеда на корону через корпус втулки и обгонную муфту действует момент сопротивления  $M_c$ , который возникает из-за трения в подшипниках, сопротивления качению колеса, аэродинамического сопротивления, силы тяжести (при движении в гору), и т. д. и т. п., т.е. всех тех факторов, из-за которых велосипедист вынужден вкручивать в поте лица. Момент сопротивления направлен встречно моменту педалирования. Через спутники он поступает на солнечную шестерню. На солнечной шестерне момент сопротивления направлен

по часовой стрелке. Солнечная шестерня мультипликатора пытается повернуться в направлении момента, но упирается в собачку включенной передачи. Через собачку момент передается на ось втулки.

Во входном редукторе момент также передается на ось 3 через шестерню 8, но направлен в противоположную сторону (против часовой стрелки). Моменты на оси от мультипликатора и редуктора, хотя и направлены встречно, не компенсируют друг друга, так как различны по величине.

Наличие некомпенсированного момента на оси втулки вызвана необходимостью ее фиксации от проворачивания, в отличие от «обычных» втулок, где ось выполняет только функции опоры подшипников качения.

Наличие передачи момента между собачкой и выступом солнечной шестерни во время педальирования приводит к возникновению силы трения. При переходе на пониженную передачу (в рассматриваемом случае с третьей на вторую), усилие пружины, убирающей собачку 11, неспособно преодолеть трение, поэтому собачка 11 остается в рабочем положении, а третья передача — включенной.

Одновременно в рабочее положение поднимается собачка 10 второй передачи. Выше было показано, что при работе третьей передачи солнце 18 вращается против часовой стрелки, а это значит, что его зацепления с собачкой 10 не произойдет (направление вращения противоположно направлению зацепления). Так как собачка поднимается не жестко, а под действием пружины, то при набегании выступов солнечной шестерни собачка будет придавливаться вниз, а затем снова приподниматься. Внешнее проявление — стрекот собачки по внутренней поверхности солнца. Переключения передачи не произойдет, но и вреда втулке нанесено не будет. Вот почему при переключении на пониженную передачу необходимо кратковременно ослаблять усилие на педалях. При снятии нагрузки трение в соединении солнечной шестерни отключаемой передачи с ее собачкой снизится, и собачка спрячется внутрь вала. После возобновления педальирования в работу вступит пониженная ступень.

#### 2.4.4. Четвертая передача

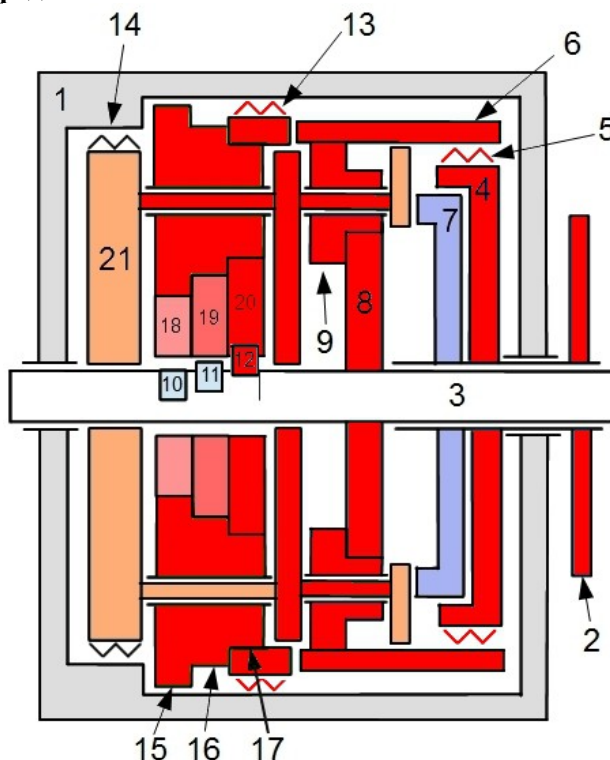


Рис. 10. Четвертая передача

Собачка 12 поднята в рабочее положение, собачка 11 опускается в дежурное. работают венец сателлита 17 и солнце 20. В остальном процесс передачи момента педальирования аналогичен третьей передаче.

## 2.4.5. Пятая передача

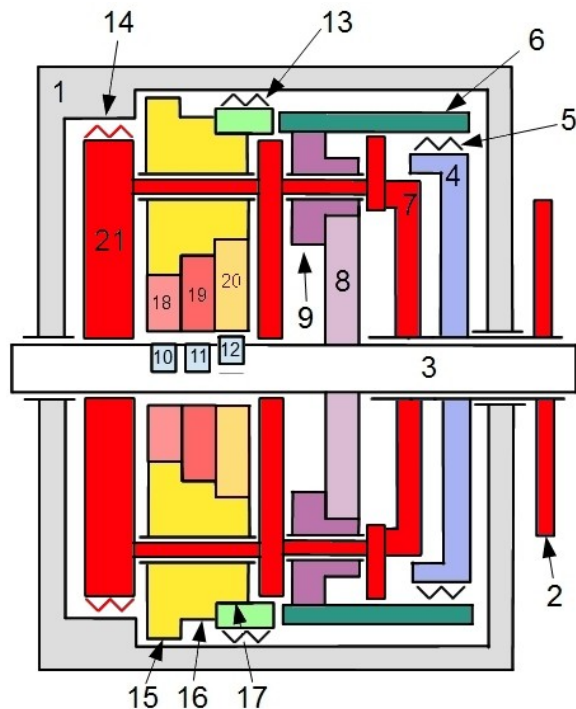


Рисунок 11. Пятая передача

Собачка 11 убирается полностью, 12 — переходит в дежурное положение.

Начиная с пятой передачи и выше механизм переключения передач передвигает сцепление 7 влево, до зацепления с водилом 21. При передаче момента на водило 21 скорость вращения короны 6 будет больше, чем у колеса 4. Обгонная муфта 5 расцепляется.

Так как мультипликатор, и, следовательно, муфта 13 в работе на пятой передаче не участвуют, происходит сцепление муфты 14 с корпусом втулки 1.

На пятой передаче момент передается без преобразования в редукторном и мультипликаторном блоке втулки, эта передача является прямой. Передаточное число втулки = 1.

## 2.4.6. Передачи 6, 7, 8

Работа втулки на передачах 6, 7, 8 аналогична передачам 2, 3, 4, с той лишь разницей, что входной редуктор выключен из работы сцеплением 7 и передает вращение мультипликатору напрямую, с передаточным отношением = 1.

Передачи 1, 2, 3, 4 являются понижающими, 5 — прямой, 6, 7, 8 повышающими.

Работа втулки представлена на рис. 12.

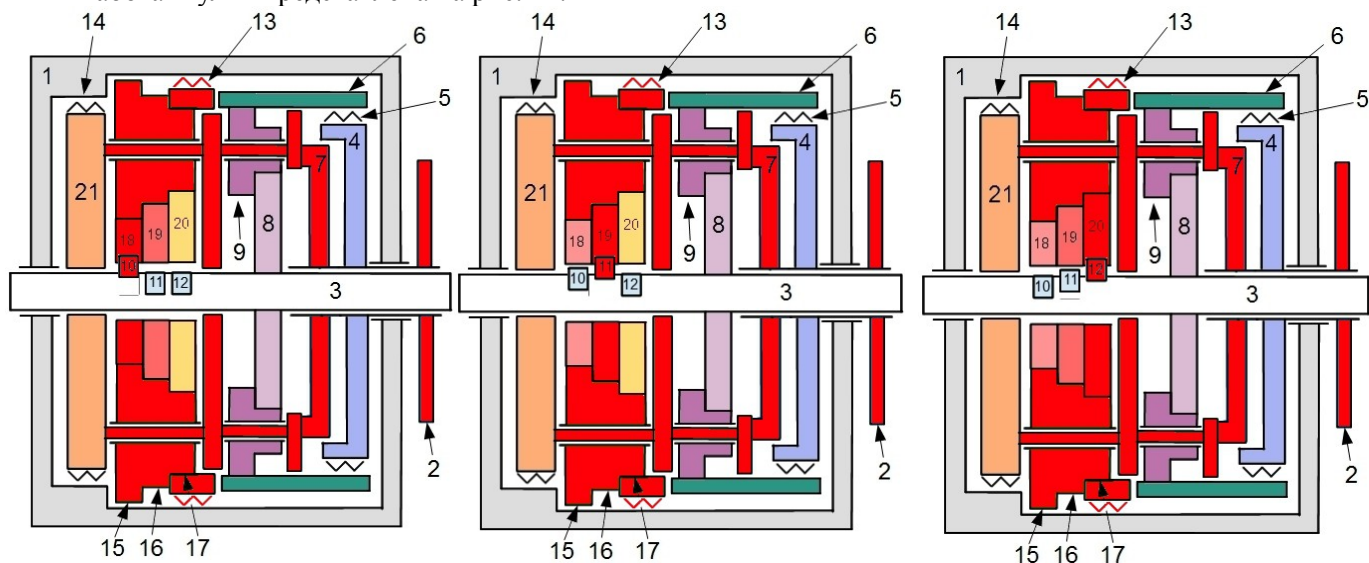


Рисунок 12. Передачи 6, 7, 8