

УДК 004.65

## ПОСТРОЕНИЕ 3D МОДЕЛИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА АВИАЦИОННОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВИНТОМ ИЗМЕНЯЕМОГО ШАГА

Д. В. САВЕЛЬЕВ<sup>1</sup>, А. О. БОРИСОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>savel99b@yandex.ru, <sup>2</sup>bor\_ao@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** Для построения 3D модели регулятора частоты вращения вала авиационного поршневого двигателя с винтом изменяемого шага нужно изучить сам винт с изменяемым шагом. Необходимо изучить историю появления винта с изменяемым шагом, как он меняет шаг и для чего это делается, изучить, какие регуляторы есть, и выбрать, с каким будет работа. После выбора регулятора начинается изучение способа его работы и особенности конструкции. После была построена 3D модель на основе гидравлического регулятора постоянных оборотов Р-2 серии 04.

**Ключевые слова:** регулятор; обороты; центробежный регулятор; вал; винт; лопасти; масло; клапан; шестерёнчатый насос.

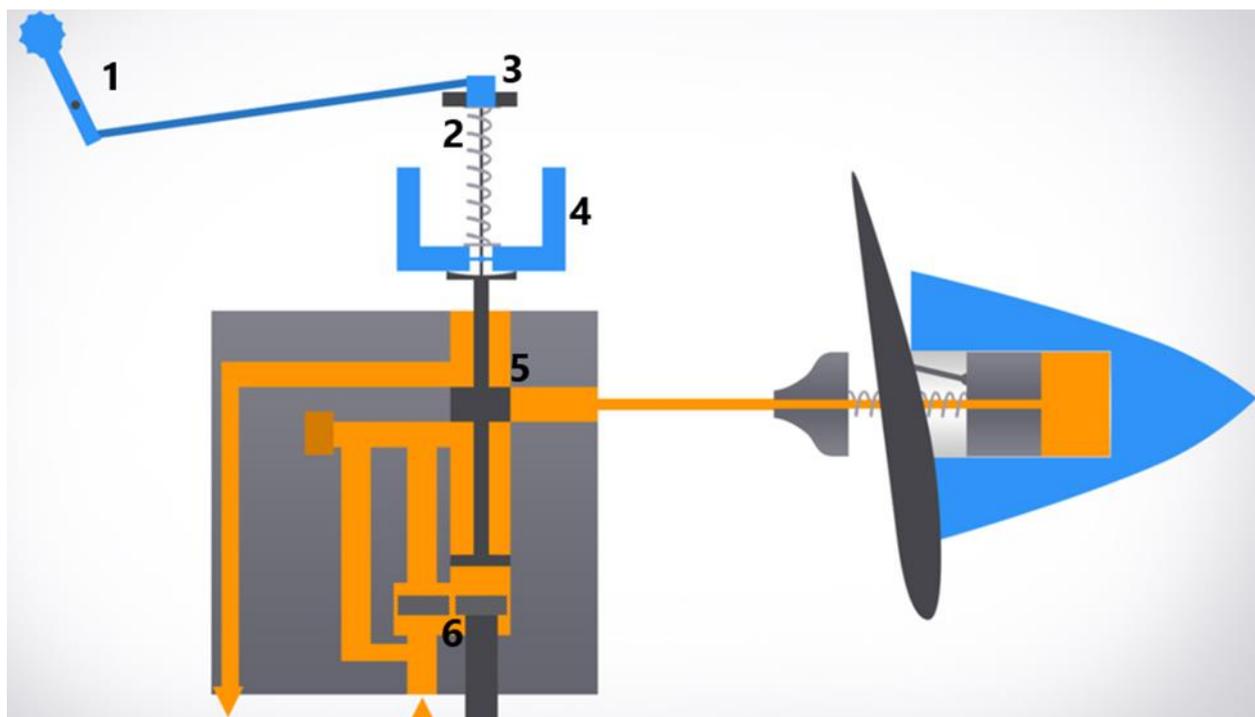
### ВВЕДЕНИЕ

Первые авиационные винты, используемые в самолётах, имели фиксированный шаг, они крепились болтами непосредственно к коленчатому валу двигателя и поэтому всегда вращаются с той же скоростью, что и двигатель. Эта конфигурация компенсирует недостаток эффективности тем, что очень проста в эксплуатации. Единственный датчик, который нужно контролировать, это тахометр. Поскольку гребной винт фиксированного шага вращается так же быстро, как и двигатель, частота вращения двигателя является лучшим показателем мощности двигателя. Используя тахометр, можно установить мощность во время взлета, полета и посадки – чем выше число оборотов в минуту, тем больше мощности выдает двигатель. Однако по мере увеличения воздушной скорости обороты также имеют тенденцию к увеличению.

Нужно внимательно следить за тахометром во время спуска на высокой скорости, чтобы убедиться, что число оборотов в минуту остается в допустимых пределах.

Так как фиксированный винт имеет ряд ограничений в использовании, в конце Первой мировой войны появились первые винты с изменяемым шагом или винт с постоянной скоростью.

Винт с постоянной скоростью имеет регулятор, который регулирует угол лопастей, чтобы поддерживать выбранную скорость вращения. Этот тип гребного винта позволяет гораздо более эффективно использовать мощность двигателя. Регулировка пропеллера в самолете очень похожа на использование шестерен в автомобиле. На низких передачах двигатель вращается быстро. Когда самолёт начинает движение, не нужно использовать большую мощность, поэтому регулятор переключается на более высокую передачу, чтобы более эффективно использовать меньшую мощность. В самолете управление винтом изменяет угол, под которым лопасти винта встречаются с воздухом, что влияет на скорость вращения двигателя.



**Рис. 1.** Схема гидравлического регулятора АПД с изменяемым шагом винта

Тахометр на приборной панели показывает скорость вращения двигателя. Схему гидравлического регулятора авиационного поршневого двигателя с изменяемым шагом можно рассмотреть на рис. 1.

На схеме обозначены:

1. рычаги управления
2. пружины ускорителя
3. резьбового вала
4. грузиков
5. главного клапана
6. шестерёнчатого насоса.

#### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВИНТОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ШАГОМ

Рассмотрим историю разработки винтов с регулируемым шагом в Германии. Идея использования воздушных винтов с регулируемым шагом настолько же стара, насколько стар и сам воздушный винт. Системы, которые изменяли угол установки лопастей воздушных винтов, изначально служили для общих испытаний пропеллеров. Позднее система изменения углов установки лопастей винта была оптимизирована для больших высот и высоких скоростей. Постоянно развитие воздушных винтов с регулируемым шагом в Германии началось уже в годы Первой мировой войны с работ профессора, дипломированного инженера Ганса Райсснера (Hans Reißner), работавшего в Аахене, Шароттенбурге и позднее в Бруклине. До 1945 г. разработкой подобных винтов занимались главным образом компании Junkers, VDM, Argus и Messerschmitt, также разрабатывали винты (с лопастями из легкого дерева) компании Schwarz и Heine.

Первые воздушные винты с регулируемым в полете шагом появились в конце Первой мировой войны вместе с появлением высотных двигателей. Компания Lorenzen предложила устройство с баллоном под давлением, которое изменяло угол установки лопастей. До завершения войны это устройство не было доработано. Зато воздушный винт Helix, созданный по проекту профессора Райсснера из берлинской высшей технической школы (Technischen

Hochschule, Berlin), оказался удачной конструкцией. Регулировка винта осуществлялась при помощи тяг и ходового винта.

Промежуточной ступенью были регулируемые воздушные винты компаний Junkers и VDM с лопастями, выполненными из легких металлов, и стальными втулками. Угол установки лопастей этих винтов можно было уставить, когда самолет находился на аэродроме. Таким образом для того или иного типа самолетов и их использования в определенных условиях подбирался оптимальный угол установки лопастей.

Двухлопастные воздушные винты компании Hamilton с гидравлическим устройством регулировки угла установки лопастей хорошо зарекомендовали себя на американских гражданских самолетах, например таких, как DC-2. У воздушных винтов фирмы Hamilton масло под давлением подавалось во втулку винта к расположенному в ней регулировочному цилиндру, под действием которого лопасти винта устанавливались в положении «взлет». Когда подача масла во втулку винта прекращалась, лопасти возвращались в положение, которое было оптимальным для совершения полета на экономичном режиме. Вариант воздушного винта, у которого угол установки лопастей винта можно было переставлять только в два положения с разницей в  $10^\circ$ , очень скоро сменился на вариант, в котором при том же числе оборотов винта диапазон установки углов лопастей был равен уже  $20^\circ$ . Кроме того, подача масла к регулирующему углу установки лопастей цилиндру могла автоматически удерживать заранее установленное – стартовое или крейсерское – число оборотов для выполнения взлета или полета на крейсерской скорости.

Объединение Vereinigten Deutschen Metallwerke VDM (Объединенные немецкие металлургические предприятия) в 1934 г. приступило к разработке электромеханического устройства, при помощи которого можно было бы регулировать угол установки лопастей воздушных винтов. Электродвигатели с левым и правым направлением вращения, приводимые при помощи переключателя через гибкий вал и планетарный редуктор, должны были осуществлять бесступенчатую регулировку угла установки лопастей винтов. Положение угла установки лопастей отображалось на датчике с циферблатом. Это было очень удобно, поскольку подходило для любого типа самолетов, любого типа установленных на самолете двигателей и не зависело от состояния самолета. В инструкции по эксплуатации положение с углом поворота лопастей  $25^\circ$  являлось основным.

Сложности при смазке предназначенного для изменения положения лопастей винта редуктора, особенно при низких температурах, привело к совместной работе компаний по производству винтов с моторостроительными компаниями. Результатом совместных работ стало то, что на новых двигателях редукторы, регулировавшие положение лопастей воздушных винтов, были встроены в корпуса понижающих редукторов двигателей, а их система смазки была связана с системой смазки самого двигателя.

В 1935 г. в компании Argus под влиянием профессора Райсснера приступили к разработке собственного устройства изменения положения лопастей воздушных винтов для установки на производившиеся компанией авиационные двигатели As-10C, As-410 и As-411. Эти авиамоторы устанавливались на учебных самолетах, и отличавшаяся простотой система регулировки угла лопастей компании Argus оказалась удачной.

Перед втулкой воздушного винта располагался обтекатель с косыми выступами, что обеспечивало необходимое усилие для изменения угла установки лопастей в ту или иную сторону после того, как система приводилась в действие. В первых вариантах в обтекателе втулки воздушного винта располагался центробежный регулятор прилагаемых при изменении угла установки лопастей усилий. Позднее в обтекателе втулки винта стали размещать еще нагнетательный масляный трубопровод двигателя. При выходе из строя двигателя оснащенный электрическим приводом вспомогательный насос воздействовал на золотник, который зафлюгировал воздушный винт.

Редукторы, при помощи которых осуществлялась перестановка лопастей винтов компании Junkers, приводились в действие масляным насосом, устанавливавшимся в коке винта. Лопасти винта VS 5 регулировались при помощи червячной передачи. Схему данного регулятора можно наблюдать на рис. 2.

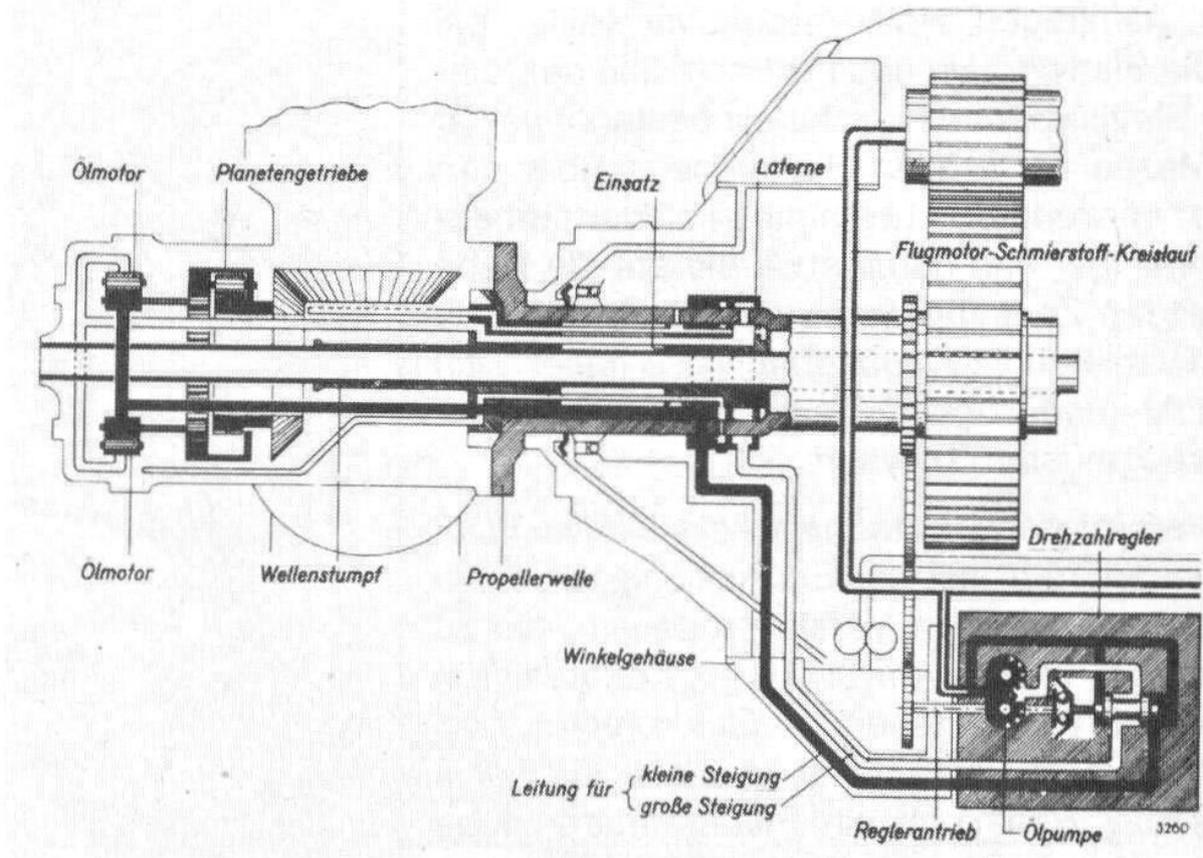


Рис. 2. Схема регулятора винта с полым валом компании Junkers VS 9, предназначенного для установки на двигатель Jumo 213

### ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ РЕГУЛЯТОР

Для автоматического регулирования угла лопастей стали использовать центробежный регулятор. Это механизм, реализующий отрицательную обратную связь для регулировки скорости вращения в машинах разнообразных принципов действия и назначения. Пример простейшего центробежного регулятора изображён на рис. 3.

Центробежный регулятор состоит из:

- вала регулятора со шкивом или зубчатым колесом
- двух грузиков, подвешенных на рычагах
- двух тяг, соединяющих рычаги с муфтой
- скользящей по валу муфты
- коромысла, одним концом закреплённого в выемке муфты, а другим соединённого с тягой исполнительного механизма (например, регулятора подачи топлива).

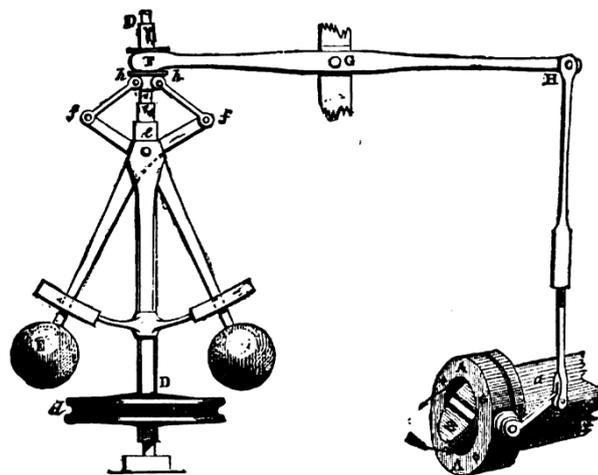


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

Рис. 3. Схема центробежного регулятора

Принцип действия регулятора: вращение вала двигателя передаётся через передачу на вал регулятора, во время вращения вала регулятора под действием центробежной силы грузики отклоняются от оси, причём чем быстрее вращается вал, тем дальше расходятся грузики. При этом рычаги взаимодействуют через тяги с муфтой и перемещают её по оси вала. Поступательное движение муфты через коромысло передаётся на тягу, соединённую с механизмом управления подачей топлива таким образом, чтобы при повышении скорости вращения вала подача уменьшалась, а при уменьшении – увеличивалась.

Данный механизм стали применять для поддержания заданной частоты оборотов вала поршневых авиационных двигателей. Он используется в гидравлических регуляторах, электрических регуляторах, электромеханических регуляторах.

#### ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР ПОСТОЯННЫХ ОБОРОТОВ

Для работы гидравлического регулятора используется масло из двигателя, оно проходит через регулятор, и в зависимости от нагрузки и оборотов увеличивает или уменьшает угол лопастей.

Как видно на рис. 1, у нас находится центробежный регулятор (4), состоящий из двух L-образных грузов, который соединён шестерёнчатой передачей с валом двигателя. Пилот в кабине с помощью рычага управления (1) выбирает необходимую частоту вращения, рычаг вращает резьбовой вал (3), который увеличивает или уменьшает нагрузку на пружину ускорителя (2). Пружина давит на грузы, вследствие чего для отклонения грузов от равновесия нужна большая или меньшая центробежная сила.

При замедлении двигателя грузы наклоняются во внутрь и толкают главный клапан (5) вниз, открывая путь маслу на слив, в результате угол лопасти уменьшается, и нагрузка на двигатель уменьшается, и двигатель ускоряется.

При ускорении двигателя грузы под действием центробежной силы наклоняются наружу и толкают главный клапан вверх, открывая путь, где находится шестерёнчатый насос (6), который подаёт масло на лопасти, масло толкает лопасти и увеличивает их угол, нагрузка возрастает, и двигатель замедляется.

#### ПОСТРОЕНИЕ 3D МОДЕЛИ

Для построения модели за основы был взят регулятор постоянных оборотов Р-2 серии 04. Внешний вид регулятора представлен на рис. 4.

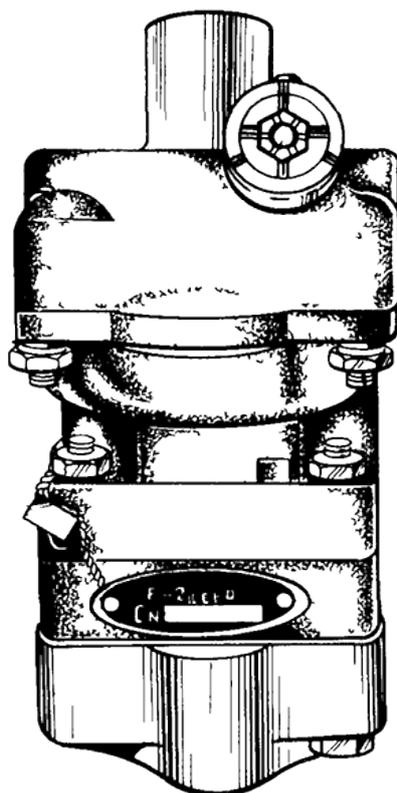


Рис. 4. Регулятор постоянных оборотов Р-2 сер. 04

Был изучен конструктивный разрез регулятора, который представлен на рис. 5 и состоит из:

1. корпус регулятора
2. корпус маслонасоса
3. ось грузика
4. кронштейн
5. стопорное кольцо
6. корпус передачи
7. ведущий вал
8. золотник
9. ось ведомой шестерни
10. ведомая шестерня
11. гайка
12. пружина редукционного клапана
13. узел центробежного регулятора
14. редукционный клапан
15. колокол
16. шарикоподшипник
17. регулировочная шайба
18. шестерня ведущего вала
19. грузик
20. валик управления
21. пружина золотника
22. зубчатая рейка
23. прокладка привода
24. штифт.

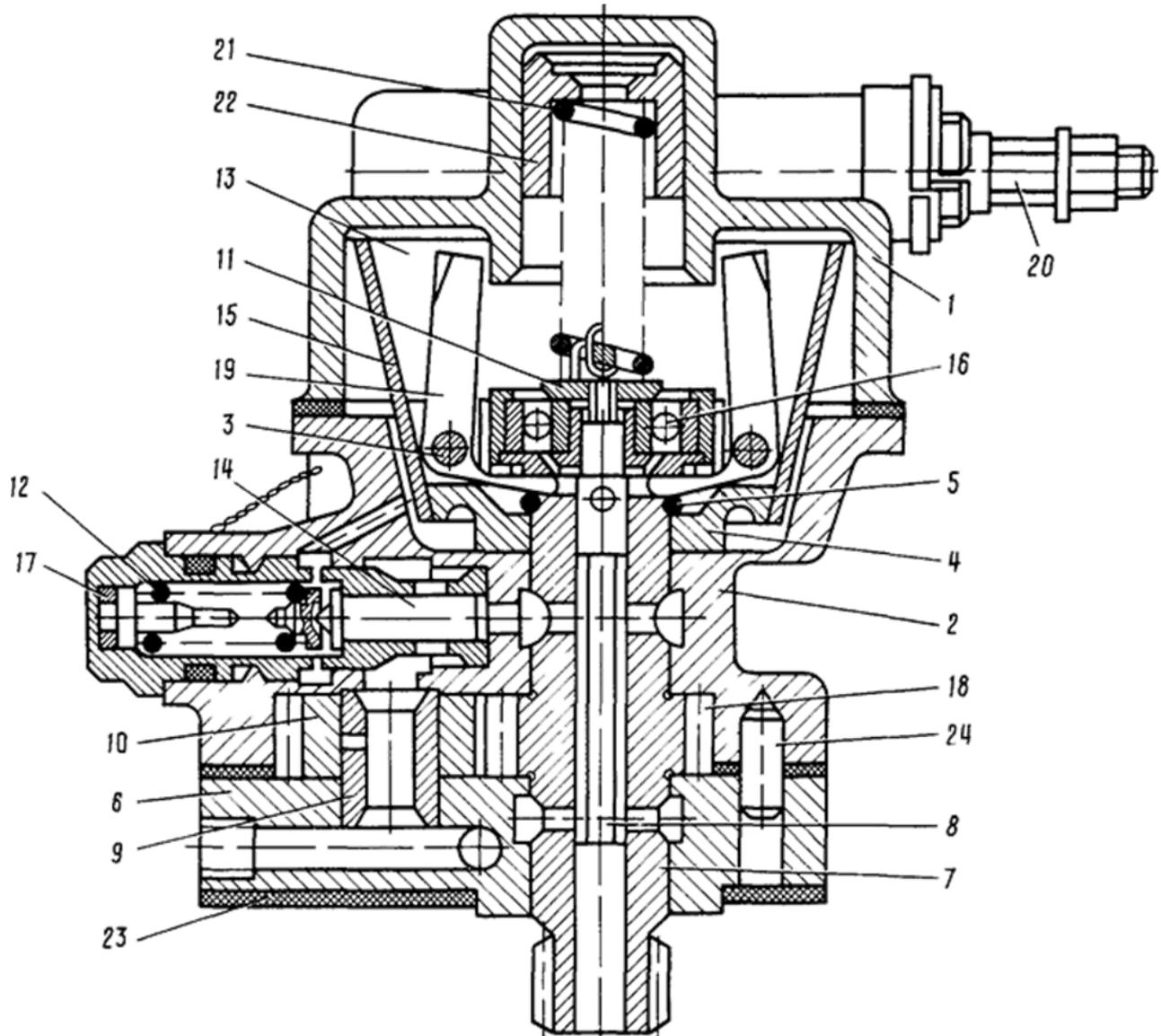
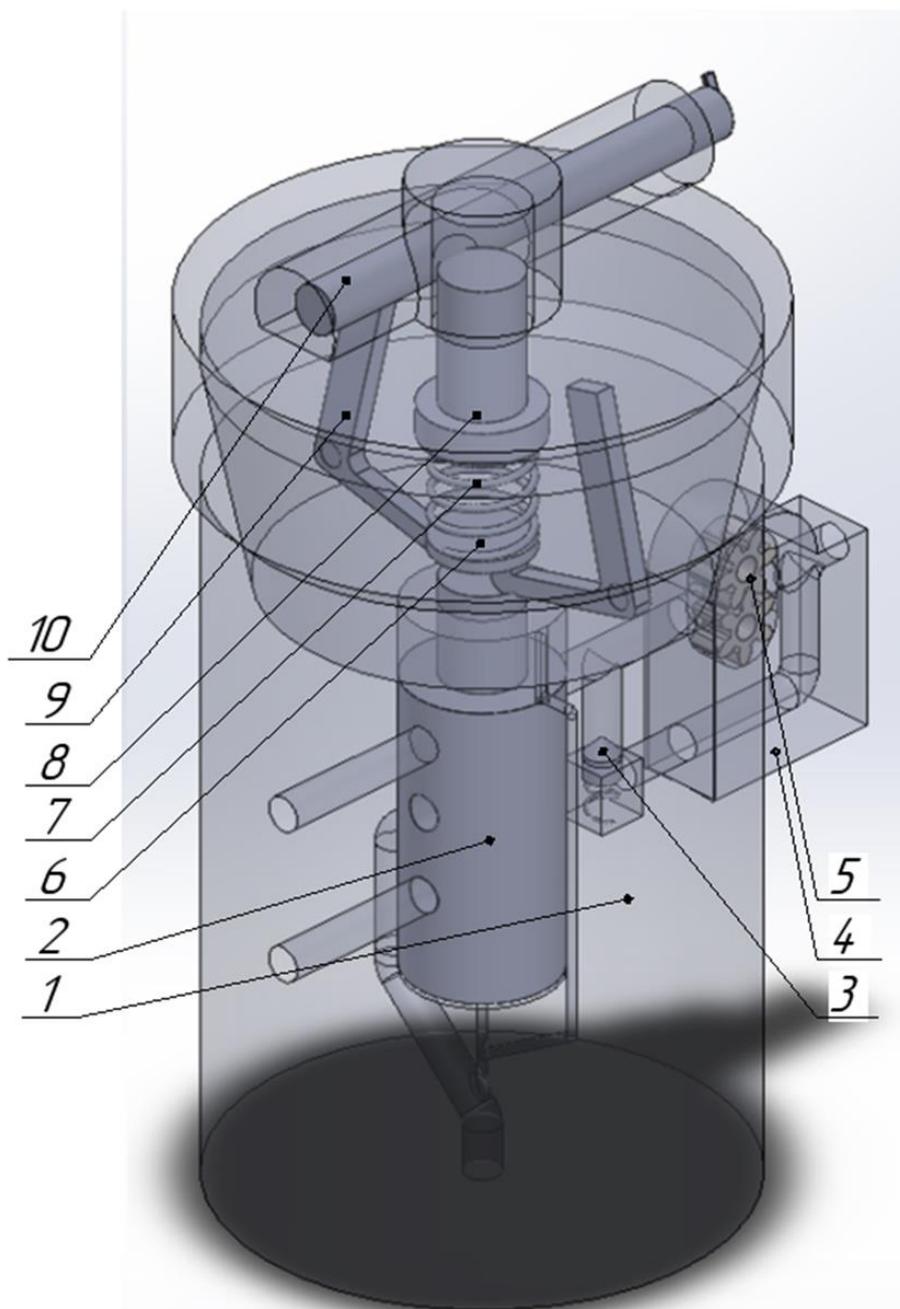


Рис. 5. Конструктивный разрез регулятора Р-2 сер. 04

Для построения модели сначала были построены его основные элементы: корпус, корпус насоса, главный клапан, I-образные грузы, шестерня, рейка, пружина ускорителя, валик управления, обратный клапан (редукционный клапан).

После в сборке эти элементы были соединены в одну модель, получившуюся модель можно наблюдать на рис. 6.



**Рис. 6.** Построенная 3D модель регулятора частоты вращения вала авиационного поршневого двигателя с винтом изменяемого шага состоящая из:

1 – корпус; 2 – клапан; 3 – обратный клапан; 4 – корпус насоса; 5 – шестерня насоса; 6 – планка; 7 – пружина ускорителя; 8 – рейка; 9 – L-образный груз; 10 – валик управления

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результат изучения истории и причины появления регулятора частоты вращения вала авиационного поршневого двигателя с винтом изменяемого шага; принцип работы гидравлического регулятора, а также построение 3D модели регулятора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулятор постоянных оборотов Р-2 серии 04 [Электронный ресурс]. URL: [https://aviatus.ru/aircraft/yak\\_52/regulator/](https://aviatus.ru/aircraft/yak_52/regulator/) (Дата обращения 10.03.2023)
2. **Борисов А. О.** Автоматическое регулирование и управление ДВС: лабораторный практикум по дисциплине «Автоматическое регулирование и управление ДВС» / Уфимск. гос авиац. техн. ун-т; Уфа: УГАТУ, 2018, 41 с.
3. How A. Constant Speed Propeller Works [Электронный ресурс]. URL: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-a-constant-speed-prop-works/> (Дата обращения 10.03.2023)

4. Controlling the Engine [Электронный ресурс]. URL: <http://krepelka.com/fsweb/learningcenter/inthecockpit/controllingtheengine.htm> (Дата обращения 10.03.2023)

5. Разработка в Германии воздушных винтов с регулируемым шагом [Электронный ресурс]. URL: <https://alternathistory.com/razrabotka-v-germanii-vozdushnyh-vintov-s-reguliruемым-shagom/> (Дата обращения 10.03.2023)

#### ОБ АВТОРАХ

**САВЕЛЬЕВ Дмитрий Валерьевич**, асп. каф. двигателей внутреннего сгорания.

**БОРИСОВ Александр Олегович**, доцент каф. двигателей внутреннего сгорания.

#### METADATA

**Title:** Constructing a 3D model of the shaft speed regulator of an aviation piston engine with a variable pitch propeller.

**Author:** D. V. Savelyev <sup>1</sup>, A. O. Borisov <sup>2</sup>

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> savel99b@yandex.ru, <sup>2</sup> bor\_ao@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (30), pp. 100-108, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** To build a 3D model of the shaft speed regulator of an aircraft piston engine with a variable pitch propeller, it is necessary to study the variable pitch propeller itself. It is necessary to study the history of the variable pitch propeller, how it changes pitch and what this is done for, study what regulators there are and choose which one to work with. After selecting the regulator, one begins to study the way it works and the features of the design. Afterwards, the 3D model was built on the basis of hydraulic constant-speed regulator R-2 of series O4.

**Key words:** regulator; revolutions; centrifugal regulator; shaft; propeller; blades; oil; valve; gear pump.

**About authors:**

**SAVELYEV Dmitry Valeryevich**, postgraduate student of the Department of Internal Combustion Engines.

**BORISOV Alexander Olegovich**, Associate Professor at the Department of Internal Combustion Engines.