

УДК 62-13

**КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЛОЖНОГО
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО
ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

**KINEMATIC ANALYSIS OF RECIPROCATING ROTATIONAL
MIXING DEVICE COMPLEX ACTUATOR**

Смелягин Анатолий Игоревич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической механики,
Кубанский государственный
технологический университет
Тел.: +7(861) 25-18-705
asmelyagin@yandex.ru

Приходько Александр Александрович

аспирант кафедры теоретической механики,
Кубанский государственный
технологический университет
Тел.: +7(918) 42-86-509
sannic92@gmail.com

Аннотация. Перемешивающие устройства широко используются для проведения большинства химических, нефтехимических и пищевых процессов. Наиболее перспективными на данный момент являются возвратно-вращательные перемешивающие устройства. Они обладают высокой интенсивностью перемешивания, в них отсутствуют вертикальные вибрации и применяются широко известные и высоконадежные механизмы. Проведен кинематический анализ исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства методом замкнутых векторных контуров. Полученная кинематическая модель описывает движение рабочих органов и позволяет проводить дальнейшие динамические и силовые исследования исполнительного механизма.

Ключевые слова: исполнительный механизм, возвратно-вращательное перемешивающее устройство, рабочий орган, кинематический анализ, аналоги скоростей, аналоги ускорений, метод замкнутых векторных контуров.

Smelyagin Anatoly Igorevich

doctor of technical Sciences,
Professor, head of Department of
theoretical mechanics,
Kuban State University of Technology
Ph.: +7(861) 25-18-705
asmelyagin@yandex.ru

Prikhod'ko Alexander Alexandrovich

post-graduate student of Department of
theoretical mechanics,
Kuban State University of Technology
Ph.: +7(918) 42-86-509
sannic92@gmail.com

Annotation. Mixing devices are widely used for most of the chemical, petrochemical and food processes. At the moment, the most perspective devices are reciprocating rotational mixing devices. They have a high mixing intensity, they lack the vertical vibration and apply well-known and highly reliable mechanisms. Kinematic analysis of mixing device actuator is presented in article. Kinematic model describes the motion of the working bodies and allows further dynamic and power research of the actuator.

Keywords: actuator, reciprocating rotational mixing device, working body, kinematic analysis, speed analogues, acceleration analogues, the method of the vector loop.

Перемешивание является одним из наиболее распространенных процессов химической технологии [1]. Перемешивающие устройства находят широкое применение в сельском хозяйстве, строительной, пищевой, химической и многих других отраслях промышленности.

На сегодняшний день наиболее универсальными и распространенными являются традиционные вращательные перемешивающие устройства с постоянной угловой скоростью вращения рабочих органов. Существенным недостатком таких машин является то, что через некоторое время скорость движения перемешиваемой среды становится равной скорости вращающихся рабочих органов, что приводит к снижению интенсивности перемешивания. Виброперемешивающие устройства (ВПУ) [2, 3] лишены этого недостатка, их применение позволяет сократить время протекания многих процессов в 1,5–2,0 раза, удельные капитальные и эксплуатационные затраты в 1,2–1,8 раза [4, 5]. Однако ВПУ свойственны значительные вертикальные вибрации, которые

передаются в окружающую среду и усложняют работу оператора, а также наличие поступательно движущегося штока, который сложно уплотнять, в результате чего такие ВПУ ненадежны и не могут использоваться в реакторах, работающих под давлением.

По принципу воздействия на обрабатываемую среду возвратно-вращательные перемешивающие устройства (ВВПУ) аналогичны виброперемешивающим устройствам, но они отличаются отсутствием вертикальных вибраций, а также применением хорошо отработанных уплотнительных устройств.

Таким образом, разработка новых структурных схем исполнительных механизмов (ИМ) ВВПУ и их исследование является актуальной задачей. В результате структурного синтеза был получен сложный ИМ ВВПУ [6, 7] с несколькими рабочими органами (рис. 1), который состоит из последовательно объединенных кривошипно-коромыслового механизма и пары зубчатых колес. Дальнейшим этапом исследований полученного механизма является его кинематический анализ.

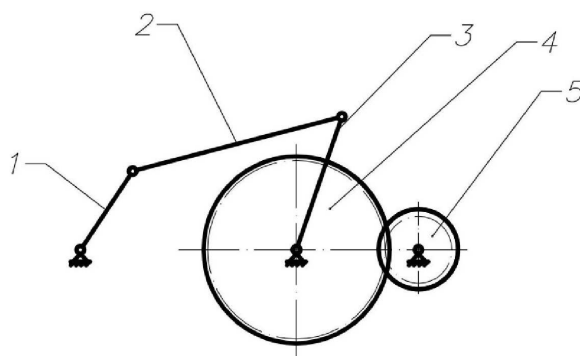


Рисунок 1 — Исполнительный механизм ВВПУ:

1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — коромысло; 4 — центральное зубчатое колесо;
5 — периферийное зубчатое колесо

Исполнительный механизм работает следующим образом. Двигатель вращает кривошип 1 (входное звено ИМ), который посредством шатуна 2 приводит в движение коромысло 3, на котором закреплено центральное зубчатое колесо 4, совершающее возвратно-вращательное движение. Зубчатое колесо 4 вращает периферийное зубчатое колесо 5, параметры движения которого определяются передаточным отношением. Движения от всех зубчатых колес (выходные звенья ИМ) передаются на валы с рабочими органами.

Кинематический анализ кривошипно-коромыслового механизма проведем в соответствии с методом замкнутых векторных контуров [8, 9]. Схему механизма располагаем в прямоугольной системе координат, начало которой помещаем в точку А, тогда положения звеньев 1, 2 и 3 механизма будут соответственно определяться углами φ_1 , φ_2 и φ_3 (рис. 2).

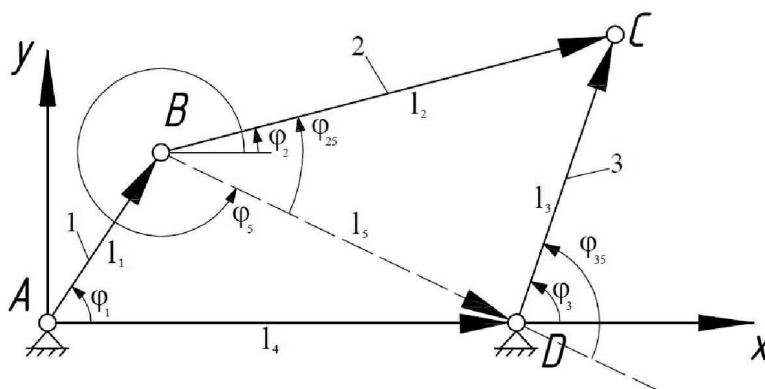


Рисунок 2 — Схема для определения кинематических параметров кривошипно-коромыслового механизма

Для удобства решения поставленной задачи разобьем замкнутый векторный контур $ABCD$ на два контура ABD и BCD .

Запишем уравнения замкнутости контура ABD в векторной форме:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_5 - \vec{l}_4 = 0. \quad (1)$$

Спроецируем (1) на оси x и y :

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos\varphi_1 + l_5 \cdot \cos\varphi_5 - l_4 = 0 \\ l_1 \cdot \sin\varphi_1 + l_5 \cdot \sin\varphi_5 = 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) величины φ_5 и l_5 определяются:

$$\varphi_5 = \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \cdot \sin\varphi_1}{l_4 - l_1 \cdot \cos\varphi_1}, \quad (3)$$

$$l_5 = -l_1 \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_5}$$

Рассмотрим векторный контур BCD . Углы наклона векторов l_2 и l_3 к вектору l_5 обозначим соответственно φ_{25} и φ_{35} .

Тогда по теореме косинусов имеем следующее:

$$\begin{aligned} l_2^2 &= l_3^2 + l_5^2 + 2l_3l_5 \cdot \cos\varphi_{35} \\ l_3^2 &= l_2^2 + l_5^2 - 2l_2l_5 \cdot \cos\varphi_{25} \end{aligned}. \quad (4)$$

Определяем из (4) углы φ_{25} и φ_{35} :

$$\begin{aligned} \varphi_{35(1)} &= \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 - l_5^2}{2l_3l_5}; \\ \varphi_{35(2)} &= 2\pi - \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 - l_5^2}{2l_3l_5}; \\ \varphi_{25(1)} &= \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 + l_5^2}{2l_2l_5}; \\ \varphi_{25(2)} &= 2\pi - \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 + l_5^2}{2l_2l_5}. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя (3) и (5), находим углы φ_2 и φ_3 :

$$\begin{aligned} \varphi_{2(1)} &= \varphi_{25(1)} + \varphi_5 = \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 + l_5^2}{2l_2l_5} + \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \cdot \sin\varphi_1}{l_4 - l_1 \cdot \cos\varphi_1}; \\ \varphi_{2(2)} &= \varphi_{25(2)} + \varphi_5 = 2\pi - \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 + l_5^2}{2l_2l_5} + \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \cdot \sin\varphi_1}{l_4 - l_1 \cdot \cos\varphi_1}; \\ \varphi_{3(1)} &= \varphi_{35(1)} + \varphi_5 = \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 - l_5^2}{2l_3l_5} + \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \cdot \sin\varphi_1}{l_4 - l_1 \cdot \cos\varphi_1}; \\ \varphi_{3(2)} &= \varphi_{35(2)} + \varphi_5 = 2\pi - \arccos \frac{l_2^2 - l_3^2 - l_5^2}{2l_3l_5} + \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \cdot \sin\varphi_1}{l_4 - l_1 \cdot \cos\varphi_1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Углы $\varphi_{2(1)}, \varphi_{3(1)}$ и $\varphi_{2(2)}, \varphi_{3(2)}$ определяют различные сборки кривошипно-коромыслового механизма.

Для определения аналогов скоростей и ускорений звеньев механизма составим уравнение замкнутости векторного контура $ABCD$ (рис. 2):

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 - \vec{l}_3 - \vec{l}_4 = 0. \quad (7)$$

Проецируем (7) на оси x и y :

$$\begin{cases} -l_4 + l_1 \cdot \cos\varphi_1 + l_2 \cdot \cos\varphi_2 = l_3 \cdot \cos\varphi_3, \\ l_1 \cdot \sin\varphi_1 + l_2 \cdot \sin\varphi_2 = l_3 \cdot \sin\varphi_3. \end{cases} \quad (8)$$

После дифференцирования уравнений (8) получим:

$$\begin{cases} -l_1 \cdot \sin\varphi_1 - l_2 \cdot \sin\varphi_2 \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = -l_3 \cdot \sin\varphi_3 \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1}, \\ l_1 \cdot \cos\varphi_1 + l_2 \cdot \cos\varphi_2 \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = l_3 \cdot \cos\varphi_3 \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1}. \end{cases} \quad (9)$$

Из углов, входящих в уравнение (9), вычтем общий угол φ_2 , что соответствует повороту осей координат xAy на общий угол φ_2 , откуда получим выражение для аналога φ'_3 угловой скорости звена 3:

$$\varphi'_3 = \frac{l_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}. \quad (10)$$

Аналогичным образом, поворачивая оси координат на угол φ_3 , получим выражения для аналога φ'_2 угловой скорости звена 2:

$$\varphi'_2 = -\frac{l_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}. \quad (11)$$

Для определения аналогов угловых ускорений φ''_2 и φ''_3 звеньев 2 и 3 продифференцируем по обобщенной координате уравнения (9) и получим:

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos\varphi_1 + \varphi'^2_2 l_2 \cdot \cos\varphi_2 + \varphi''_2 l_2 \cdot \sin\varphi_2 = \varphi'^2_3 l_3 \cdot \cos\varphi_3 + \varphi''_3 l_3 \cdot \sin\varphi_3 \\ -l_1 \cdot \sin\varphi_1 - \varphi'^2_2 l_2 \cdot \sin\varphi_2 + \varphi''_2 l_2 \cdot \cos\varphi_2 = -\varphi'^2_3 l_3 \cdot \sin\varphi_3 + \varphi''_3 l_3 \cdot \cos\varphi_3 \end{cases}. \quad (12)$$

Аналоги ускорений φ''_2 и φ''_3 определим, выполнив преобразования координат последовательным поворотом координат на углы φ_2 и φ_3 :

$$\begin{aligned} \varphi''_3 &= \frac{l_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi'^2_2 l_2 - \varphi'^2_3 l_3 \cdot \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}{l_3 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}, \\ \varphi''_2 &= \frac{l_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - \varphi'^2_3 l_3 + \varphi'^2_2 l_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_3)}{-l_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для проведения динамического и силового анализа необходимо найти положения, аналоги скоростей и ускорений центров масс кривошипно-коромыслового механизма. Схему механизма располагаем в прямоугольной системе координат и обозначим центры масс кривошипа, шатуна и коромысла соответственно C_1 , C_2 , и C_3 (рис. 3).

Положение центра масс кривошипа C_1 будет определяться по формуле:

$$\begin{cases} x_{C1} = \frac{l_1}{2} \cdot \cos\varphi_1, \\ y_{C1} = \frac{l_1}{2} \cdot \sin\varphi_1. \end{cases} \quad (14)$$

Продифференцируем (14) для получения аналогов скоростей и ускорений центра масс кривошипа:

$$\begin{cases} x'_{C1} = -\frac{l_1}{2} \cdot \sin\varphi_1, \\ y'_{C1} = \frac{l_1}{2} \cdot \cos\varphi_1. \end{cases} \quad (15)$$

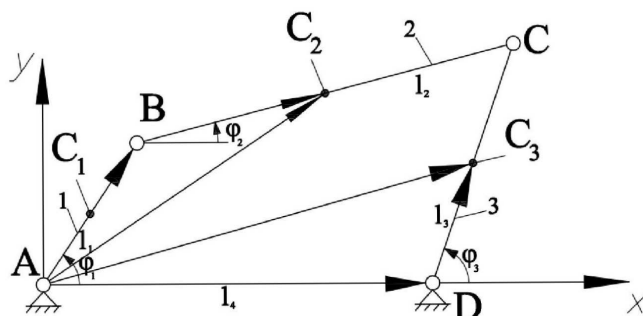


Рисунок 3 — Схема для определения кинематических параметров центров масс

$$\begin{cases} x_{C1}'' = -\frac{l_1}{2} \cdot \cos\varphi_1, \\ y_{C1}'' = \frac{l_1}{2} \cdot \sin\varphi_1. \end{cases} \quad (16)$$

Составим уравнение замкнутости векторного контура ABC_2 :

$$\vec{l}_1 + \vec{BC}_2 - \vec{AC}_2 = 0. \quad (17)$$

Спроецируем (17) на оси x и y :

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos\varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 = x_{C2}, \\ l_1 \cdot \sin\varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 = y_{C2}. \end{cases} \quad (18)$$

Продифференцируем (18) для получения аналогов скоростей и ускорений центра масс шатуна:

$$\begin{cases} -l_1 \cdot \sin\varphi_1 - \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 \cdot \varphi_2' = x_{C2}', \\ l_1 \cdot \cos\varphi_1 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 \cdot \varphi_2' = y_{C2}'. \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} -l_1 \cdot \cos\varphi_1 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 \cdot (\varphi_2')^2 - \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 \cdot \varphi_2'' = x_{C2}'', \\ -l_1 \cdot \sin\varphi_1 - \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 \cdot (\varphi_2')^2 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 \cdot \varphi_2'' = y_{C2}''. \end{cases} \quad (20)$$

Составим уравнение замкнутости векторного контура AC_3D :

$$\vec{AC}_3 - \vec{DC}_3 - \vec{l}_4 = 0. \quad (21)$$

Спроецируем (21) на оси x и y :

$$\begin{cases} l_4 + \frac{l_3}{2} \cdot \cos\varphi_3 = x_{C3}, \\ \frac{l_3}{2} \cdot \sin\varphi_3 = y_{C3}. \end{cases} \quad (22)$$

Продифференцируем (22) для получения аналогов скоростей и ускорений центра масс коромысла:

$$\begin{cases} -\frac{l_3}{2} \cdot \sin\varphi_3 \cdot \varphi_3' = x_{C3}', \\ \frac{l_3}{2} \cdot \cos\varphi_3 \cdot \varphi_3' = y_{C3}'. \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} -\frac{l_3}{2} \cdot \cos\varphi_3 \cdot (\varphi_3')^2 - \frac{l_3}{2} \cdot \sin\varphi_3 \cdot \varphi_3'' = x_{C3}'' , \\ \frac{l_3}{2} \cdot \sin\varphi_3 \cdot (\varphi_3')^2 + \frac{l_3}{2} \cdot \cos\varphi_3 \cdot \varphi_3'' = y_{C3}'' . \end{cases} \quad (24)$$

Таким образом, формулы (14)–(24) описывают положения, аналоги скоростей и ускорений центров масс кривошипно-коромыслового механизма.

В синтезированном ИМ возвратно-вращательное движение коромысла 3 передается на жестко соединенное с ним центральное зубчатое колесо 4 (рис. 1):

$$\begin{aligned} \varphi_{зк4} &= \varphi_3; \\ \varphi'_{зк4} &= \varphi'_3; \\ \varphi''_{зк4} &= \varphi''_3, \end{aligned} \quad (25)$$

где $\varphi_{зк4}$, $\varphi'_{зк4}$ и $\varphi''_{зк4}$ — соответственно угол поворота, аналог скорости и аналог ускорения зубчатого колеса 4.

Параметры движения периферийного зубчатого колеса 5 (рис. 1) определяются передаточным отношением u :

$$\begin{aligned} \varphi_{зк5} &= \varphi_{зк4} \cdot u; \\ \varphi'_{зк5} &= \varphi'_{зк4} \cdot u; \\ \varphi''_{зк5} &= \varphi''_{зк4} \cdot u, \end{aligned} \quad (26)$$

где $\varphi_{зк5}$, $\varphi'_{зк5}$ и $\varphi''_{зк5}$ — соответственно угол поворота, аналог скорости и аналог ускорения зубчатого колеса 5.

Используя вышеприведенные формулы, построим кинематические модели для различных возможных случаев реализации исполнительного механизма ВВПУ:

1. $l_1 = 0,37$ м, $l_2 = 0,85$ м, $l_3 = 0,55$ м, $l_4 = 0,85$ м, $u = 2$ (рис. 4, а);
2. $l_1 = 0,37$ м, $l_2 = 0,85$ м, $l_3 = 1,00$ м, $l_4 = 0,85$ м, $u = 2$ (рис. 4, б);
3. $l_1 = 0,37$ м, $l_2 = 0,85$ м, $l_3 = 0,55$ м, $l_4 = 0,85$ м, $u = 0.5$ (рис. 4, в).

Анализ приведенных на рисунке 4 зависимостей $\varphi(\varphi_1)$, $\varphi'(\varphi_1)$, $\varphi''(\varphi_1)$ показывает, что:

- выходные звенья синтезированного ИМ передают на рабочие органы возвратно-вращательные движения с изменяющимися значениями угловой скорости за цикл;
- изменение длины коромысла позволяет регулировать угол колебаний центрального зубчатого колеса (центрального рабочего органа) в широких пределах (рис. 4, а и 4, б);
- применение зубчатой передачи позволяет регулировать угол колебаний (число оборотов за цикл) периферийного рабочего органа в широком диапазоне (рис. 4, а и 4, в).

Итак, в результате работы проведен кинематический анализ исполнительного механизма ВВПУ с несколькими рабочими органами. В результате анализа получены формулы для определения положений, аналогов скоростей и ускорений звеньев и центров масс кривошипно-коромыслового механизма, центрального и периферийного зубчатых колес, которые необходимы для динамического и силового анализа ВВПУ.

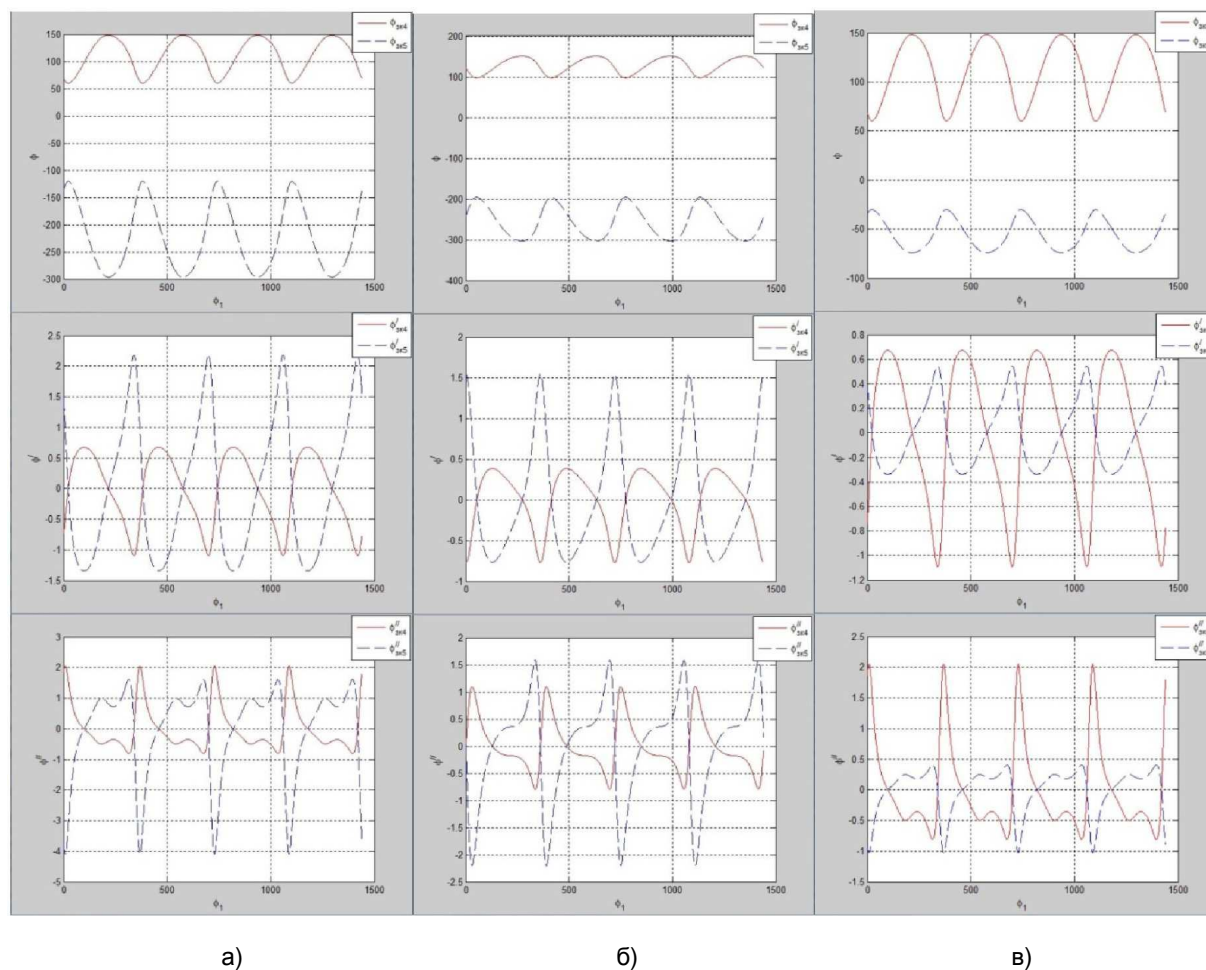


Рисунок 4 — Кинематические модели ИМ ВВПУ с различными размерами звеньев

Литература:

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
2. Смелягин А. И., Юхневич И.В. Структурный и параметрический синтез исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2013. – № 2–3. – С. 93–96.
3. Смелягин А.И., Юхневич И.В. Структурный синтез и кинематический анализ простых исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств // Омский научный вестник. – 2012. – № 3–113. – С. 72–75.
4. Ткаченко Р.Н., Христюк В.Т., Смелягин А.И. Использование вибрационного воздействия в технологии красных вин // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2010. – № 1. – С. 61–64.
5. Ткаченко Р.Н., Христюк В.Т., Смелягин А.И. Влияние вибрационной обработки мезги винограда на химический состав виноматериалов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 10. – С. 52–55.
6. Смелягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2014. – № 5–6. – С. 85–88.
7. Пат. 2528843 РФ, МПК⁷ В01F7/18. Перемешивающее устройство / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // БИПМ. 20.09.2014.
8. Зиновьев В.А. Курс теории механизмов и машин. – М. : Наука, 1975. – 204 с.
9. Смелягин А.И. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование : Учебное пособие. – М. : ИНФРА-М; Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 263 с.

References:

1. Braginskiy L.N., Begachev V.I., Barabash V.M., Peremeshivanie v zhidkikh sredakh: Fizicheskie osnovy i inzhenernye metody rascheta (Mixing in fluids: Basic physics and engineering methods of calculation). – L., 1984. – 336 p.
2. Smelyagin A.I., Yukhnevich I.V. Structural and parametrical synthesis of executive mechanisms of the vibromixing devices // *Izv.vuzov. Pishchevaya tekhnologiya.* – 2013. – №. 2–3. – P. 93–96.
3. Smelyagin A.I., Yukhnevich I.V. Structural synthesis and the kinematic analysis of simple executive mechanisms of the vibromixing devices // *Omskiy nauchnyy vestnik.* – 2012. – №. 3. – P. 72–75.
4. Tkachenko R.N., Khristyuk V.T., Smelyagin A.I. Use of vibration influence in technology of red wines // *Izv.vuzov. Pishchevaya tekhnologiya.* – 2010. – №. 1. – P. 61–64.
5. Tkachenko R.N., Khristyuk V.T., Smelyagin A.I. Influence of vibration processing of album of grapes on a chemical composition of wine materials // *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya.* – 2011. – №. 10. – P. 52–55.
6. Smelyagin A.I., Prikhodko A.A. Structural synthesis of the difficult executive mechanism of the returnable and rotary mixing device // *Izv.vuzov. Pishchevaya tekhnologiya.* – 2014. – №. 5–6. – P. 85–88.
7. Prikhodko A.A., Smelyagin A.I., Peremeshivayushchee ustroystvo (Mixing device). Pat. 2528843 RU, BIPM, 20.09.2014.
8. Zinoviev V.A. Kurs teorii mekhanizmov i mashin (Course in the theory of mechanisms and machines). – M., 1975. – 204 p.
9. Smelyagin A.I. Teoriya mekhanizmov i mashin (Theory of mechanisms and machines). – M., Novosibirsk, 2006. – 263 p.