

О.И. ПИЛИПЕНКО, д.т.н., проф., заведующий каф. ОКМ ЧНТУ, Чернигов;
А.В. ПОЛУЯН, аспирант каф. ОКМ ЧНТУ

ДИНАМИКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПНОГО ПРИВОДА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ И ПОЛИМЕРНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Показан новый подход к расчёту динамики напряжённо-деформированного состояния элементов цепных передач, учитывающий реальные динамические процессы, неизбежно сопровождающие работу цепных приводов. Рассмотрено изменение: динамических нагрузок, действующих в двухмассовых цепных контурах, необходимой мощности цепных приводов, а также распределения напряжений, результирующих перемещений, коэффициента запаса прочности пластин звеньев металлического приводного роликового цепного контура и упругого монолитного звена полимерной цепи.

Ключевые слова: напряжённо-деформированное состояние пластин звеньев цепи и упругого полимерного монолитного звена.

Введение. Актуальность задачи. Известно, что напряженно-деформированное состояние – это совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на материальное тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов. Совокупность напряжений полностью характеризует напряжённое состояние частицы тела. Эту совокупность записывают в виде тензора напряжений, а совокупность компонентов деформации характеризует деформированное состояние частицы тела. Также эту совокупность записывают в виде тензора деформации.

Различают такие напряжённые состояния материального тела: линейные, когда действует только одно главное напряжение, отличное от нуля, плоское – при котором векторы напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} лежат в одной плоскости, и объёмное, когда все три главных напряжения σ_x , σ_y и σ_z отличны от нуля. Объёмное напряжённо-деформированное состояние можно разложить на сумму двух состояний: трёхосного растяжения и сложного сдвига в трёх координатных плоскостях [1].

Как известно, прочностные свойства материала при воздействии статических и динамических нагрузок не одинаковы, а его разрушение имеет принципиальное различие, обусловленное характером деформации. При статических нагрузках напряжения и деформации распределены равномерно по всему объёму изотропного тела, поскольку каждая его частица принимает участие в процессе деформации, а при динамических нагрузках напряжения, деформации и разрушение материала возникают в одной части тела независимо от того, что происходит в другой его части, особенно это имеет место в полимерных композициях. При работе цепных передач также возникают и вибрационные нагрузки на звёздочки и контур цепи, которые сосредоточены в местах многократного микроударного взаимодействия ролика цепи со звёздочками передачи. Как результат такого воздействия возникают большие локализованные напряжения и перемещения материала, которые настолько быстро изменяются во времени, что возникающие микротрещины ещё не успевают распространиться по материалу, а распределение напряжений и деформаций уже изменилось.

Анализ последних исследований и литературы. Литературные источники [2-4] описывают конструктивные особенности ведущих отечественных и зарубежных приводных роликовых цепей, а также результаты эксперименталь-

ных исследований, которые проводились на усталостную прочность пластин. В работе [5] показаны результаты машинных экспериментов по оценке статического напряжённо-деформированного состояния пластин звеньев цепи, которые подтверждают сложный характер взаимодействия пластин и сопряжённых с ними деталей, неравномерность полей напряжений и деформаций в сечениях пластин, причём максимальная концентрация напряжений определяется в области ослабленного отверстием сечения пластины.

Цель статьи. Показать новый динамический подход к расчёту напряжённо-деформированного состояния элементов приводных роликовых цепей при реальных динамических нагрузках, возникающих при движении цепного контура по звёздочкам.

Постановка задачи. Из анализа последних исследований и литературы следует, что расчёт напряжённо-деформированного состояния пластин звеньев приводных роликовых цепей в динамике не проводился.

Материалы исследований. Материалом для исследования являются элементы металлического и полимерного контуров двухмассового цепного привода.

Результаты исследований. В [6-8] рассмотрены динамические параметры и экспериментальное подтверждение целесообразности применения программного комплекса SolidWorks при решении вопросов проектирования, анализа и имитации работы цепных приводов в металлическом и полимерном их исполнении.

Рассмотрим 3D конструкции двухмассовой цепной передачи в металлическом (рисунок 1,а) и полимерном исполнении (рисунок 1,б). Построены: 3D модели металлических и полимерных звёздочек цепной передачи согласно параметров и качественных характеристик по ГОСТ 591-69; металлическая цепь – по ГОСТ 13568-97, что соответствует ISO 606-94, и полимерная цепь – согласно [9].

Для расчёта основных динамических характеристик и напряжённо-деформированного состояния элементов цепных передач были заданы следующие параметры: направление вращения ведущей звёздочки (красные стрелки, рисунок 1) – против часовой стрелки с частотой $n_1=300\text{мин}^{-1}$; момент сопротивления ведомой звёздочки $T_2=50\text{Н}\cdot\text{м}$ (синие стрелки, рисунок 1); время полного исследования с учётом переходных процессов – от 0 до 4 секунд, что соответствует более, чем одному периоду вращения цепного контура; время для исследования напряжённо-деформированного состояния пластины внутреннего звена металлического цепного контура и упругого монолитного звена полимерного цепного контура составляет от 0,5 до 1,05 секунды, что соответствует одному периоду вращения цепного контура в установившемся режиме работы; ускорение земного тяготения направлено в сторону, противоположную оси Y (рисунок 1).

Охарактеризуем время расчёта: от 0 до 0,3 секунды ведущая звёздочка постепенно набирает частоту вращения ($0-300\text{мин}^{-1}$); от 0,3 до 3,7 секунд – система работает при установившемся режиме; от 3,7 до 4 секунд ведущая звёздочка постепенно уменьшает свою частоту вращения ($300-0\text{мин}^{-1}$).

Для построения сравнительных характеристик выберем набегающий шарнир цепи на ведущую звёздочку z_1 в металлическом исполнении и набегающее упругое монолитное звено – в полимерном.

Рассмотрим и проанализируем графики, полученные в результате расчёта цепных приводов: динамические нагрузки цепного контура (рисунок 2); изменения необходимой мощности привода (рисунок 3).

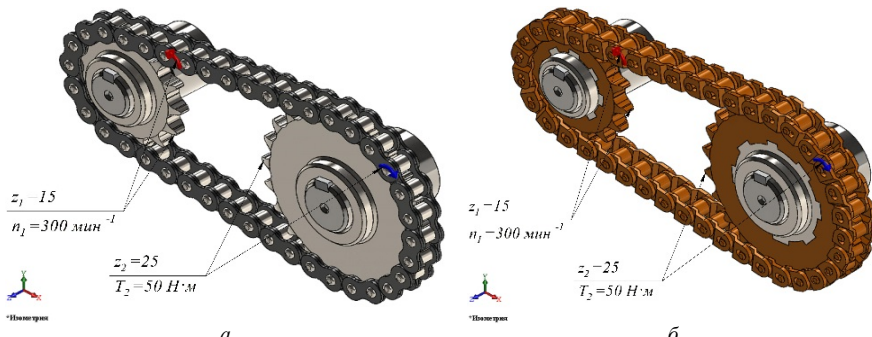


Рисунок 1 – 3D конструкции двухмассовой цепной передачи:
а – в металлическом исполнении; б – в полимерном исполнении

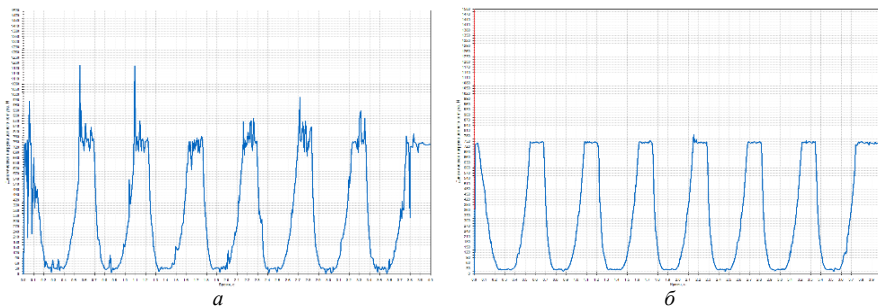


Рисунок 2 – Динамические нагрузки цепного контура, Н:
а – в металлическом исполнении; б – в полимерном исполнении

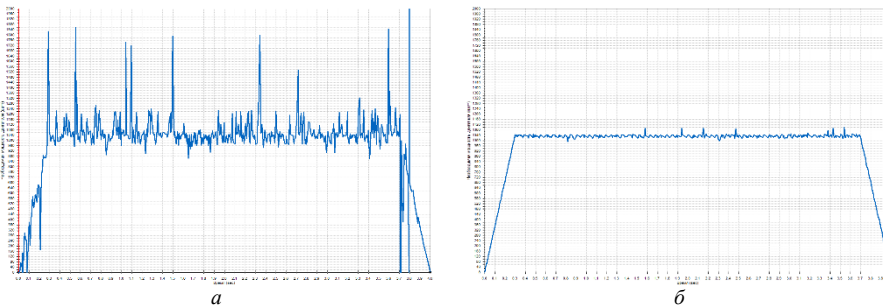


Рисунок 3 – Изменение необходимой мощности цепного привода, Вт:
а – в металлическом исполнении (среднее значение 991Вт);
б – в полимерном исполнении (среднее значение 960Вт)

Из анализа графиков (рисунок 2) следует, что среднее значение динамической нагрузки в металлическом исполнении передачи составляет 345Н, а в полимерном – 331Н. Разность средних значений составляет 14Н, что в свою очередь, подтверждает целесообразность применения элементов цепной передачи из полимерных композитов.

Амплитуды изменения необходимой мощности цепного привода при работе цепной передачи в металлическом исполнении (рисунок 3,а) в несколько раз больше, чем в полимерном (рисунок 3,б). Разность средних значений изме-

нения необходимой мощности цепного привода при различном исполнении элементов передачи составляет 31Вт.

Рассмотрим на основе каких уравнений происходит расчёт напряжённо-деформированного состояния элементов цепных передач в SolidWorks.

Напряжение von Mises или эквивалентное напряжение представляет собой величину, рассчитанную исходя из его составляющих. Несмотря на то, что эквивалентное напряжение в какой-либо точке определяет напряжённое состояние в этой точке неоднозначно, оно предоставляет информацию, достаточную для оценки надёжности конструкции для многих пластичных материалов. Оно полностью определяется величиной, выраженной в единицах напряжения. Напряжение von Mises использует критерий отказа для оценки пластичных материалов, и вычисляется следующим образом на основе шести компонентов [10]:

$$\sigma_{von Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}},$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения.

Теория Мизеса-Генки (Mises-Hencky) утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению, в качестве которого в большинстве случаев используется предел текучести. Как известно, предел текучести зависит от температуры. Заданная величина предела текучести должна учитывать температуру компонента. Коэффициент запаса прочности в данном месте будет рассчитываться следующим образом:

$$(FOS) = \frac{\sigma_{предел}}{\sigma_{vonMises}}$$

Результирующее упругое перемещение (*URES*) не использует справочную геометрию, которая определяет форму или очертание поверхности твёрдого тела. К справочной геометрии относятся плоскости, оси, системы координат, а также точки.

Формы режимов потери устойчивости иллюстрируют только перемещение узлов относительно друг друга. Значения перемещений вычисляются на основании различных процедур нормализации.

Программа нормализует каждую форму колебаний таким образом:

$$\{\phi_i\}^T \cdot [K_G] \cdot \{\phi_i\} = [I],$$

где $\{\phi_i\}$ – вектор, представляющий *i*-ю форму потери устойчивости; $\{\phi_i\}^T$ – транспонирование вектора $\{\phi_i\}$; $[K_G]$ – геометрическая матрица жёсткости; $[I]$ – единичная матрица.

Проанализируем максимальные распределения напряжений (рисунок 4), максимальные результирующие упругие перемещения (рисунок 5), минимальные значения коэффициента запаса прочности пластин звеньев металлической цепи и упругом монолитном звене полимерной цепи (рисунок 6).

На графиках (рисунки 4,5) чётко видны пики максимальных значений распределения напряжений и результирующих упругих перемещений как в металлическом, так и в полимерном исполнении, которые возникают в одно и то же время на обоих графиках. Это свидетельствует о том, что при возникновении максимального (пикового) напряжения возникает и соответствующее ему максимальное (пиковое) результирующее упругое перемещение в узлах исследуемых элементов цепи (рисунок 7).

При этом максимальное напряжение упругого монолитного полимерного звена меньше, чем в металлической пластине внутреннего звена цепи. В случае металлического исполнения пластина внутреннего звена в пиковый момент начинает перемещаться по ведущей ветви цепного контура, то есть шарнир выходит из контакта с ведомой звёздочкой, а в полимерном исполнении – наоборот, упругое монолитное звено контактирует с ведущей звёздочкой. В эти моменты наблюдается также снижение минимального коэффициента запаса прочности материала обеих исследуемых элементов цепи (рисунок 6). Это является подтверждением существования возникающих вибрационных нагрузок, которые многократно действуют на звёздочки и контур цепи в процессе работы передачи, и сосредоточены в местах микроударного взаимодействия ролика цепи со звёздочками. В результате такого воздействия возникают большие лока-

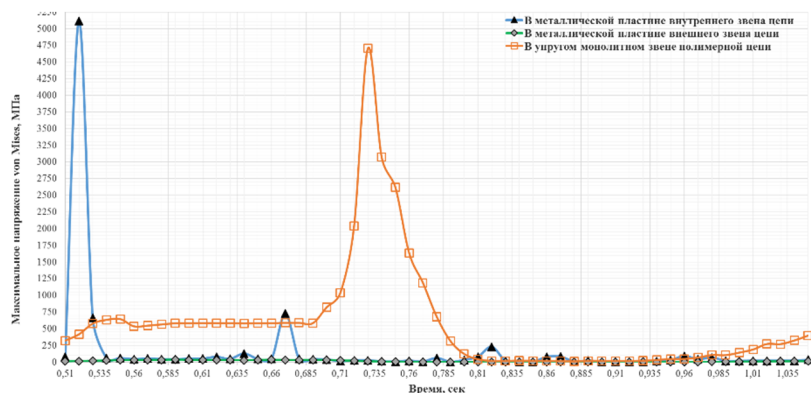


Рисунок 4 – Сравнение максимальных распределений напряжений в пластине звеньев металлической цепи и упругом монолитном звене полимерной цепи (средние значения максимальных распределений напряжений: в металлической пластине внешнего звена – 14,58МПа, в металлической пластине внутреннего звена – 157МПа; в полимерном звене – 567МПа)

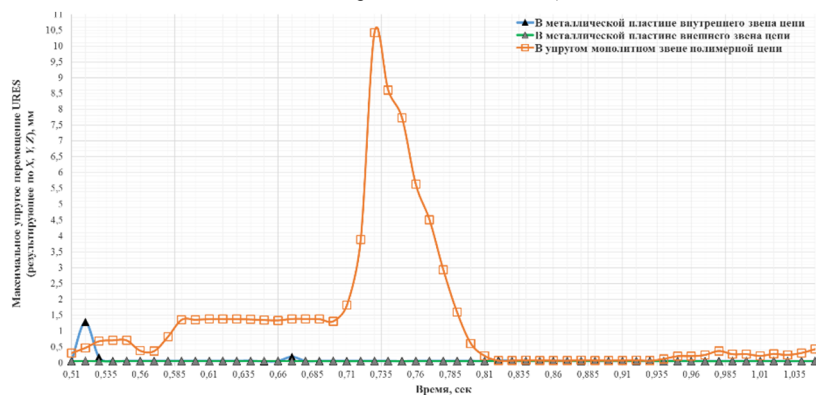


Рисунок 5 – Сравнение максимальных результирующих упругих перемещений в пластинах звеньев металлической цепи и упругом монолитном звене полимерной цепи (средние значения максимальных результирующих упругих перемещений: в металлической пластине внешнего звена – 0,06мм, в металлической пластине внутреннего звена – 0,09мм; в полимерном звене – 1,33мм)

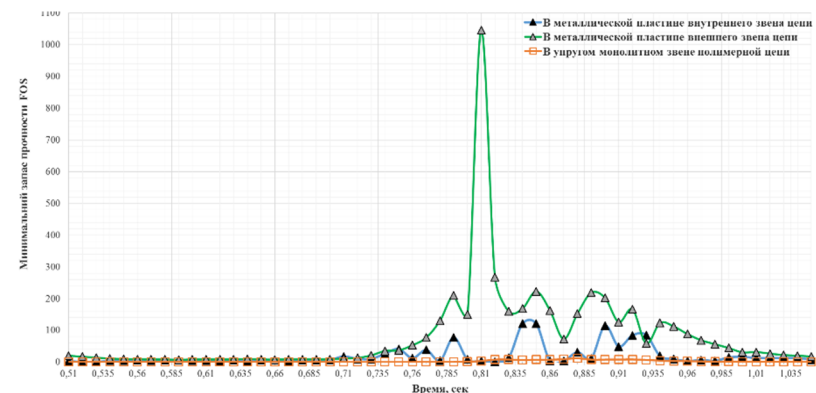


Рисунок 6 – Сравнение минимальных значений коэффициента запаса прочности пластин звеньев металлической цепи и упругого монолитного звена полимерной цепи (средние значения минимальных значений коэффициента запаса прочности исследуемых элементов: в металлической пластине внешнего звена – 83,63, в металлической пластине внутреннего звена – 20,22; в полимерном звене – 2,27)

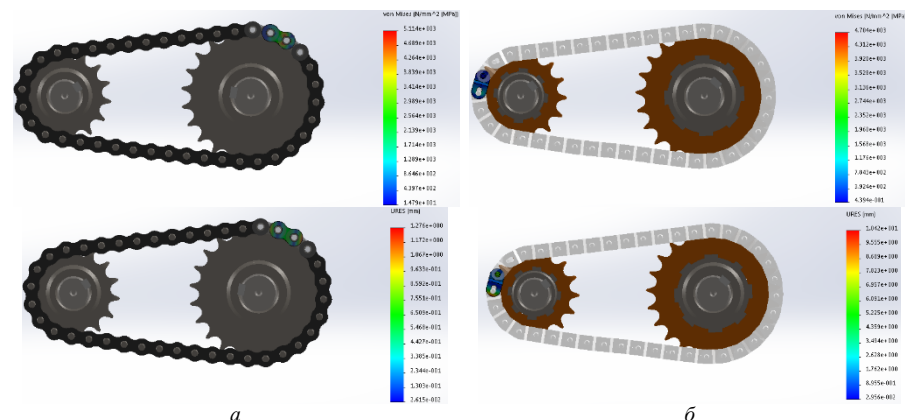


Рисунок 7 – Максимальные (пиковые) напряжения и результирующие упругие перемещения в узлах исследуемых элементов цепи: а – в пластине внутреннего звена металлической цепи; б – в упругом монолитном звене полимерной цепи. лизованные напряжения и упругие перемещения в материале, что в большинстве случаев и является причиной разрыва пластин звеньев металлической цепи.

Выводы:

1. Показан новый подход к расчёту динамики напряжённо-деформированного состояния элементов цепных передач, который учитывает реальные динамические процессы, происходящие во время работы цепных приводов. Из анализа графиков (рисунок 2) следует, что разность средних значений динамических нагрузок в контурах составила 14Н, что подтверждает целесообразность применения элементов цепной передачи из полимерных композитов.

2. Разность средних значений необходимой мощности цепного привода при различном исполнении элементов передачи составила 31Вт. Максимальное напряжение упругого монолитного полимерного звена меньше, чем в ме-

таллической пластине внутреннего звена цепи. При возникновении максимального (пикового) напряжения возникает и соответствующее ему максимальное (пиковое) результирующее упругое перемещение в узлах исследуемых элементов цепи. В эти же моменты наблюдается также снижение минимального коэффициента запаса прочности материала обеих исследуемых элементов цепи (рисунок 6). Кроме того, полученное среднее минимальное значение коэффициента запаса прочности пластин металлической цепи соответствует традиционному высокому значению для таких цепей, а для полимерной цепи это значение укладывается в машиностроительные нормы.

3. Подтверждено существование возникающих вибрационных нагрузок, которые многократно действуют на звёздочки и контур цепи в процессе работы передачи, и сосредоточены в местах микроударного взаимодействия ролика цепи со звёздочками и, как результат такого воздействия, возникают большие локализованные напряжения и упругие перемещения в материале, что в большинстве случаев и является причиной разрыва пластин звеньев цепи.

Список литературы: 1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Напряжённо-деформированное_состояние. 2. Романовский Б.В., Столбин Г.Б. Влияние макрогеометрии и формы пластин роликовых цепей на усталостную прочность пластин. Сборник "Механические передачи" (Цепи и зубчатые ремни) Под ред. Г.Б. Столбина, НИИМАШ, 1971. 3. Романовский Б.В. Уточненный расчет на усталостную прочность пластин роликовых цепей / В сб. Механические передачи, НИИМАШ. – М.: 1971. 4. Романовский Б.В., Викулов А.С., Потёмкин А.Н. Об ударно-циклической прочности приводных цепей // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Материалы VII Междунар. научно-технической конференции. Ч.2. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С.226-231. 5. Каменев С.В., Лапынина М.Ю., Фот А.П., Чепасов В.И. Напряжённо-деформированное состояние пластин звеньев приводных роликовых цепей. // Вестник ОГУ. – 2014. – №1. – С.196-202. 6. Pilipenko O.I., Poluyan A.V. Dynamic parameters of a chain transmission in metal and polymer design. Proceedings. 11th technologies, international congress MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS 2014. 17-20 September 2014. – Varna, Bulgaria. – Volume 1. – Pages 70-74. ISSN 1310-3946 (11/160). 7. Pilipenko O.I., Poluyan A.V. 3D modeling of experimental stand for research n-mass chain transmission // Proceedings. The sixth world congress "Aviation in the XXI-st century". "Safety in Aviation and Technologies". September 23-25, 2014. – Kyiv, Ukraine. – Volume 1. – Pages 1.9.16-1.9.19. 8. Pilipenko O., Poluyan A. Project 3D Design, Calculation and Analysis of Chain Drives in Metal and Polymer Realization. International Journal of Mechanical Engineering and Automation. Ethan Publishing, USA. Volume 2, Number 1, 2015. – P.40-46. Print ISSN: 2333-9179. Online ISSN: 2333-9187. 9. Пилипенко О.И., Козар І.Ф., Степенко А.П. Пружна монолітна ланка ланцюга. Патент України 23341А. – Бюл. №4, 31.08.98. 10. <http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks>. Online.

Bibliography (transliterated): 1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Napryazhenno-deformirovannoe_sostoyaniye. Online. 2. Romanovskyy B.V., Stolbyn H.B. Vlyyanye makroheometryy y formy plastyn rolykovykh tsepey na ustalostnuyu prochnosty plastyn. Sbornyk "Mekhanycheskiye peredachy" (Tsepy y zubchatye remny) Pod. red. H.B. Stolbyna, NYIMASH, 1971. Print. 3. Romanovskyy B.V. Utochnenny raschet na ustalostnuyu prochnost' plastyn rolykovykh tsepey / V sb. Mekhanycheskiye peredachy, NYIMASH, Moskow: 1971. Print. 4. Romanovskyy B.V., Vykulov A.S., Potyemkin A.N. Ob udarno-tyklycheskoy prochnosty pryvodnykh tsepey. Problemy kachestva y ekspluatatsyy avtotransportnykh sredstv: Materyaly VII Mezhdunar. nauchno-tekhnycheskoy konferentsyy. Ch.2. – Penza: PHUAS – 2012. – P.226-231. Print. 5. Kamenev S.V., Lapyrnina M.Yu., Fot A.P., Chepasov V.Y. Napryazhyenno-deformirovannoe sostoyaniye plastyn zven'ev pryvodnykh rolykovykh tsepey // Vestnyk OHU. – 2014. – No1. – P.196-202. Print. 6. Pilipenko O.I., Poluyan A.V. Dynamic parameters of a chain transmission in metal and polymer design. Proceedings. 11th technologies, international congress MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS 2014. P.17-20 September 2014. Varna, Bulgaria. Vol.1. P.70-74. ISSN 1310-3946 (11/160). Print. 7. Pilipenko O.I., Poluyan A.V. 3D modeling of experimental stand for research n-mass chain transmission. Proceedings. The sixth world congress "Aviation in the XXI-st century". "Safety in Aviation and Technologies". September 23-25, 2014. Kyiv, Ukraine. Vol.1. P.1.9.16-1.9.19. Print. 8. Pilipenko O., Poluyan A. Project 3D Design, Calculation and Analysis of Chain Drives in Metal and Polymer Realization. International Journal of Mechanical Engineering and Automation. Ethan Publishing, USA. Vol.2, No1, 2015. – P.40-46. Print ISSN: 2333-9179. Online ISSN: 2333-9187. Print. 9. Pylypenko O.I., Kozar I.F., Stepenko A.P. Pruzhdna monolitna lanka lantsyuha. Patent Ukrayiny 23341A. Byul. No4, 31.08.98. 10. <http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks>. Online.

Поступила (received) 12.03.2015