

УДК 621.83.062

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, С.А. РОМАШКЕВИЧ

Одесская национальная академия пищевых технологий

ДИНАМИКА СЕПАРАТОРА МЕХАНИЗМА СВОБОДНОГО ХОДА В СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ

В работе обоснована целесообразность изучения движения сепараторов с роликами в период свободного движения механизмов свободного хода (МСХ) и оценка его перемещения, что необходимо для выбора параметров МСХ при их проектировании. Целью исследования динамики системы сепаратора с роликами является изучение амплитудно-частотных характеристик сепаратора. Составлено дифференциальное уравнение динамики сепаратора с роликами. Движение описывается применительно к плоскому движению сепаратора, совершающего переносное вращательное движение совместно со звездочкой с угловой скоростью звездочки и вращательное – относительно звездочки. В результате решения дифференциального уравнения, приведен график изменения угла относительного поворота сепаратора совместно с цилиндрическими роликами с учетом жесткости пружины общесепараторного прижимного устройства при различных режимах движения обоймы и звездочки.

Ключевые слова: механизм свободного хода, сепаратор с роликами, колебательное движение сепаратора, относительный угол поворота сепаратора.

ROBERT VACHAGANOVICH AMBARTSUMYANTS, SERGEY ALEKSANDROVICH ROMASHKEVICH
Odessa National Academy of Food Technologies

DYNAMICS OF THE SEPARATOR OF THE FREE – WHEEL MECHANISM IN FREE MOTION

The expediency of studying of the separators with rollers movement during free motion of the free – wheel mechanisms (FWM) and the estimation of its transfer, that is necessary for choice of the FWM parameters during their projection, has been grounded. The aim of investigation of the dynamics of the separator with rollers system is studying of amplitude – frequency characteristics of the separator, which greatly influence wearing of the working areas of the elements, stipulates readiness of FWM for jamming at the end of the period of the free motion.

For composition of differential equation of dynamics of the separator with rollers, the Lagrange equation of the second type has been used. The motion is described concerning plane movement of the separator, carrying out portable rotary movement together with a sprocket with the sprocket angular speed and rotary movement concerning the sprocket. The movement of the rollers is presented as two components – transient rotary together with the separator around the axis of the mechanism and relative rotation in the separator windows around theirs. The solution of the differential equation, which allows to determine the angle of the relative turning of the separator together with cylindrical rollers, taking into account spring tension of the general separator clamping device during different conditions of the casing and sprocket movement, has been presented.

Keywords: free – wheel mechanism, separator with rollers, oscillatory movement of a separator, relative angle of a separator turning.

Работа механизма свободного хода (МСХ) характеризуется следующими процессами: заклиниванием, расклиниванием и свободным ходом. После расклинивания МСХ сепаратор с телами заклинивания может совершать вращательное движение относительно внутренней или внешней звездочки, с которой он связан упругим звеном – пружиной кручения либо сжатия. При относительном движении сепаратора в МСХ с внутренней звездочкой ролики отрываются от звездочки и под действием центробежных сил прижимаются к обойме. В МСХ с наружной звездочкой центробежные силы отрывают тела заклинивания от внутренней обоймы и прижимают их к рабочей поверхности звездочки.

В работе [1] изучено движение только ролика МСХ в период свободного хода. Однако задача о характере изменения движения ролика с сепаратором не рассмотрены, что весьма важно при их проектировании.

В виду того, что МСХ с сепараторами широко используются в технике, необходимо изучить динамику сепараторов с роликами в период свободного хода и оценить их перемещения. Результаты исследования позволят обосновать выбор параметров МСХ при проектировании.

У МСХ с индивидуальными прижимами колебательную систему образует ролик и прижим. Колебания такой системы частично исследованы в ряде работ [1, 2 и др.].

Целью работы является изучение амплитудно-частотных характеристик МСХ с сепараторами, которые оказывают существенное влияние на износ рабочих поверхностей элементов, обуславливающих готовность МСХ к заклиниванию в конце периода свободного хода.

Для составления дифференциального уравнения динамики сепаратора с роликами используем уравнение Лагранжа II рода [3].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_c} \right) - \frac{\partial K}{\partial \varphi_c} = Q_F + Q_P + Q_R, \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия системы сепаратора с роликами;

φ_c и $\dot{\varphi}_c$ – угол поворота (обобщенная координата) и угловая скорость сепаратора при его движении относительно звездочки;

Q_F – обобщенная сила, соответствующая возмущающим силам;

Q_P – обобщенная сила, соответствующая восстанавливающим силам;

Q_R – обобщенная сила, соответствующая силам сопротивления.

Исследуем динамику системы подпружиненного сепаратора с роликами для наиболее типичного случая функционирования МСХ с внутренней звездочкой, когда ролики, потеряв контакт, вращаются вокруг своих осей. Расчетная схема для такого случая периода свободного хода показана на рис. 1. Потеря роликами внутреннего контакта означает выполнение условия перемещения сепаратора относительно звездочки. Динамику сепаратора с роликами изучаем, когда вращение внутренней звездочки совпадает с направлением вращения обоймы и противоположно.

Кинетическая энергия K системы сепаратора с роликами состоит из кинетической энергии K_c сепаратора и кинетической энергии K_p роликов

$$K = K_c + K_p . \tag{2}$$

Кинетическую энергию K_c определим применительно к плоскому движению сепаратора, совершающего переносное движение совместно со звездочкой с угловой скоростью $\dot{\phi}_2$ и вращательное – относительно звездочки с угловой скоростью $\dot{\phi}_c$. Тогда абсолютная скорость сепаратора при однонаправленном и разнонаправленном движении сепаратора и звездочки в широкую часть клинового пространства (рис. 1) соответственно, равна:

$$\dot{\phi}_{cao} = \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_c , \tag{3}$$

$$\dot{\phi}_{cap} = \dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_c . \tag{4}$$

Кинетическая энергия сепаратора при плоском его движении

$$K_c = 0,5I_c\dot{\phi}_{ca}^2 , \tag{5}$$

где I_c – момент инерции сепаратора относительно центра вращения МСХ.

Движение роликов представим состоящим из переносного вместе с сепаратором $\dot{\phi}_{ca}$ и относительного вращения в окнах сепаратора вокруг своих осей с угловой скоростью $\dot{\phi}_p$.

Кинетическая энергия одного ролика

$$K_{p1} = 0,5I_p\dot{\phi}_{pa}^2 , \tag{6}$$

где I_p – момент инерции ролика относительно центральной оси вращения МСХ;

$\dot{\phi}_{pa}$ – абсолютная угловая скорость ролика.

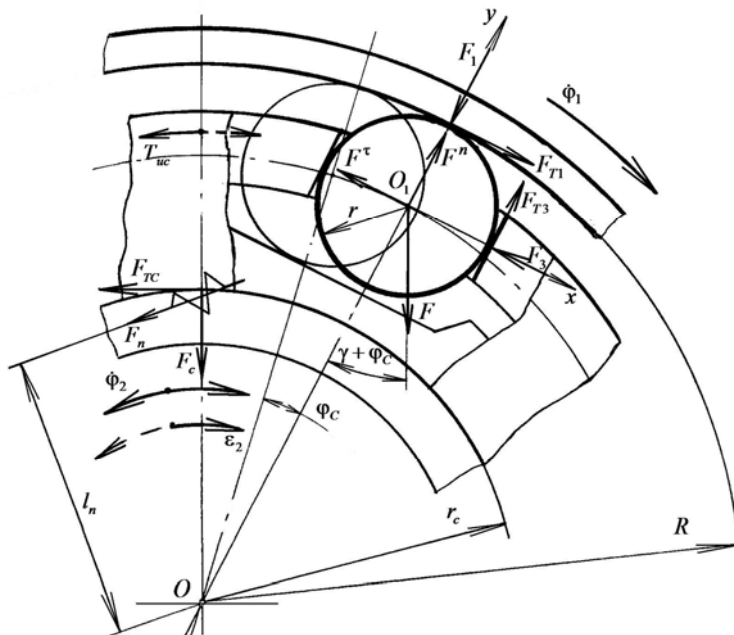


Рис. 1. Схема механизма свободного хода с сепаратором с внутренней звездочкой

Абсолютная угловая скорость ролика

$$\dot{\phi}_{pa} = \dot{\phi}_{ca} + \dot{\phi}_p . \tag{7}$$

Подобно катку фрикционного дифференциала, угловая скорость ролика в относительном вращении

в окнах сепаратора при однонаправленном и разнонаправленном вращениях обоймы и звездочки получим:

$$\dot{\varphi}_{po} = [\dot{\varphi}_1 - (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c)]u; \quad (8)$$

$$\dot{\varphi}_{pp} = [\dot{\varphi}_1 + (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c)]u, \quad (9)$$

где $u = \frac{R}{r}$;

R – радиус обоймы МСХ;

r – радиус ролика.

Абсолютная угловая скорость роликов при однонаправленном $\dot{\varphi}_{pao}$ и разнонаправленном $\dot{\varphi}_{pap}$ вращениях обоймы и звездочки

$$\dot{\varphi}_{pao} = (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c) + [\dot{\varphi}_1 - (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c)] \cdot u, \quad (10)$$

$$\dot{\varphi}_{pap} = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) + [\dot{\varphi}_1 + (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c)] \cdot u. \quad (11)$$

Момент инерции ролика относительно центральной оси МСХ записываем в виде

$$I_p = m \cdot (0,5r^2 + l^2), \quad (12)$$

где m – масса ролика;

l – расстояние от центральной оси МСХ до оси ролика.

Выражение (6) с учетом зависимостей (10), (11) и (12), получаем кинетическую энергию для общего количества z роликов, принимает вид:

– обоймы и звездочки вращаются в одинаковых направлениях

$$K_{po} = 0,5mz \cdot (0,5r^2 + l^2) \cdot [(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c) + (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) \cdot u]^2; \quad (13)$$

– обоймы и звездочки вращаются в разных направлениях

$$K_{pp} = 0,5mz \cdot (0,5r^2 + l^2) \cdot [(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) \cdot u]^2. \quad (14)$$

Кинетическая энергия системы сепаратора с роликами K , согласно выражению (2), определяем после подстановки в него зависимостей (5) для однонаправленного вращения с учетом (3), (13) и (4), (14) для разнонаправленного вращения. Имеем:

$$K_o = 0,5I_c(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c)^2 + 0,5mz \cdot (0,5r^2 + l^2) \cdot [(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_c) + (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) \cdot u]^2; \quad (15)$$

$$K_p = 0,5I_c(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c)^2 + 0,5mz \cdot (0,5r^2 + l^2) \cdot [(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_c) \cdot u]^2. \quad (16)$$

Начало относительного движения сепаратора обуславливается потерей контакта роликов с внутренней звездочкой, т.е. нормальная реакция на поверхности контакта ролика со звездочкой $F_2 = 0$. Отсюда в начальный момент движения сепаратора принимаем $F_2 = 0$, что с незначительной погрешностью предопределяет перемещение сепаратора $\varphi_c = 0$ (рис. 1). Следовательно, движение сепаратора описывается с момента потери контакта, и это положение принимается как начальное.

Возмущающая сила Q_F обуславливается силой трения F_{T1} в контакте ролика с поверхностью обоймы. Силу трения F_{T1} , зависящую от нормальной реакции на поверхности контакта ролика с обоймой F_1 , находим $F_{T1} = f_1 F_1$.

Величину силы F_1 определяем из условия равновесия, записанного в виде суммы проекций всех сил, действующих на ролики $\sum F_y = 0$ (рис. 1), где ось y – в проход через центр МСХ и одного из роликов. Имеем $-F_1 + f_3 F_3 + F^n - F \cos(\gamma + \varphi_c) = 0$. Здесь усилие F_3 , действующее на ролик от общесепараторного прижимного устройства, находим по выражению $F_3 = \frac{F_n l_n}{zl}$. Тогда

$$F_1 = \frac{f_3 F_n l_n}{zl} + F^n - F \cos(\gamma + \varphi_c), \quad (17)$$

где $F_n = F_{n0} + F_{n\delta}$ – общесепараторное усилие; $F_{n0} = \frac{c\varphi_0}{l_n}$ – первоначальное усилие пружины и

$F_{n\delta} = \frac{c\varphi_c}{l_n}$ – прижимное усилие, возникающего при движении сепаратора, c – коэффициент угловой жесткости пружины; φ_0 – первоначальная деформация (угол установки) пружины при контактном положении роликов.

Выражение для определения общего прижимного усилия пружины получаем в виде

$$F_n = \frac{c(\varphi_0 + \varphi_c)}{l_n}. \quad (18)$$

Момент силы трения F_{Tc} , возникающей на центрирующей поверхности сепаратора и звездочки, препятствует относительному перемещению сепаратора, и его значение определяем по формуле

$$T_{Tc} = F_{Tc}r_c = F_0r_c f_c.$$

Сила тяжести сепаратора с роликами находим из выражения

$$F_0 = F_c + \sum_{i=1}^z F \sin^2(\gamma_i + \varphi_c). \quad (19)$$

Тогда обобщенная возмущающая сила $Q_F = zmlf_1\dot{\varphi}_{ca}^2 + \frac{f_1f_3F_n l_n r}{l} - F_0 f_c r_c \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_c$.

В виду малости угла φ_c в выражении (19) принимаем $\sin \varphi_c \approx \varphi_c$; $\cos \varphi_c \approx 1$. Тогда, после преобразования выражения (19) для силы тяжести получим

$$F_0 = F_c + \sum F \cdot (\sin^2 \gamma_i + 2\varphi_c \cos \gamma_i \sin \gamma_i + \varphi_c^2 \cos^2 \gamma_i). \quad (20)$$

Поскольку в выражении (19) угол φ_c не влияет на суммарную силу тяжести роликов, а угловая скорость сепаратора $\dot{\varphi}_c$, по сравнению с угловой скоростью звездочки $\dot{\varphi}_2$ незначительна, то угловая скорость $\dot{\varphi}_{ca}$ (см. выражение (3)) также незначительна. Тогда, при определении обобщенной силы Q_F ролики распределены равномерно по периметру сепаратора, то этими параметрами можно пренебречь.

Учитывая, что $\sum_{i=1}^z F \cos \gamma_i \sin \gamma_i = 0$, $\sum_{i=1}^z F \sin(\gamma_i + \varphi_c) = 0$, то после преобразований для обобщенной возмущающей силы при одинаковом и противоположном направлениях вращения обоймы и звездочки находим

$$Q_F = zmlf_1 R \dot{\varphi}_2^2 + \frac{\varphi_c f_1 f_3 c R}{l} + \frac{\varphi_o f_1 f_3 c R}{l} - f_c r_c \left(F_c + \sum_{i=1}^z F \sin^2 \gamma_i \right) \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_c. \quad (21)$$

В выражении (21) введен символ «sgn» в предположении, что сепаратор совершает колебательное движение. Соответственно при изменении направления движения сепаратора изменяется направление силы трения на центрирующей поверхности сепаратора и звездочки.

Восстанавливающую силу Q_P определим выражением

$$Q_P = -\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_c}, \quad (22)$$

где Π – потенциальная энергия общесепараторного прижимного устройства.

$$\Pi = 0,5c(\varphi_o + \varphi_c)^2. \quad (23)$$

Согласно (22) находим

$$Q_P = -c(\varphi_o + \varphi_c). \quad (24)$$

Силы сопротивления Q_R препятствуют перемещению роликов с сепаратором, расположенных в вязкой среде обильно смазанного МСХ.

Сила сопротивления среды, применительно к МСХ, зависит от размеров роликов, от относительной скорости движения сепаратора $\dot{\varphi}_c$ и от физических свойств жидкости применяющейся при смазке МСХ[1].

Тогда обобщенную силу сопротивления Q_R определяем из выражения

$$Q_R = \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_c}, \quad (25)$$

где Φ – функция рассеяния энергии движущихся роликов.

Функция рассеяния энергии z роликов определяется из выражения кинетической энергии роликов при их относительном перемещении совместно с сепаратором со скоростью $\dot{\varphi}_c$

$$K = 0,5I_p \dot{\varphi}_c^2, \quad (26)$$

С учетом зависимости (12) выражение (26) принимает вид

$$K = 0,5m(0,5r^2 + l^2) \cdot \dot{\varphi}_c^2. \quad (27)$$

Для определения функции рассеяния энергии необходимо вместо массы ролика m в выражении (27) подставить коэффициент затухания ξ

$$\xi = 6\pi\mu r,$$

где μ – динамический коэффициент вязкости смазки.

Тогда функция рассеяния

$$\Phi = 0,5z6\pi\mu r \cdot (0,5r^2 + l^2) \cdot \dot{\varphi}_c^2. \quad (28)$$

После подстановки производной кинетической энергии $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_c} \right)$, согласно выражениям (15) и (16),

а также выражений (21), (24) и производной функции рассеяния энергии роликов (25), в уравнение (1) получаем дифференциальное уравнение динамики подпружиненного сепаратора с роликами при одновременном неравномерном, соответственно однонаправленном и разнонаправленном вращении обоймы и звездочки

$$A\ddot{\varphi}_c + B\dot{\varphi}_c + C\varphi_c + D\ddot{\varphi}_2 - E\dot{\varphi}_1 = a\dot{\varphi}_2^2 - b\varphi_o - p \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_c, \quad (29)$$

$$A\ddot{\varphi}_c + B\dot{\varphi}_c + C\varphi_c - D\ddot{\varphi}_2 - E\dot{\varphi}_1 = a\dot{\varphi}_2^2 - b\varphi_o - p \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_c, \quad (30)$$

где

$$A = I_c + mz(1+u) \cdot (0,5r^2 + l^2);$$

$$B = 3\pi\mu z \cdot [r^3(1+u) + 2rl^2(1+u)] = 3\pi\mu z \cdot (1+u) \cdot (r^3 + 2rl^2);$$

$$C = c \cdot \left(1 - \frac{f_1 f_3 R}{l} \right);$$

$$D = I_c + mz(1+u) \cdot (r^3 + 2rl^2);$$

$$E = mzu \cdot (0,5r^2 + l^2);$$

$$a = mzf_1 R;$$

$$b = c \cdot \left(1 - \frac{f_1 f_3 R}{l} \right);$$

$$p = f_c r_c \left(F_c + \sum_{i=1}^z F \sin^2 \gamma_i \right).$$

При известных законах изменения угловой скорости $\omega_2(t)$ и ускорения $\varepsilon_2(t)$ и величине начального прижимного усилия F_{n0} , жесткости пружины c сепараторного прижимного устройства можно определить характер функционирования сепаратора с роликами при наличии контакта роликов или его отсутствия с рабочими поверхностями звездочки и обоймы.

Выполнено решение численным методом зависимостей (29) и (30) при начальных условиях в начале свободного хода $t=0$ и $\varphi_c=0$ применительно к сепараторному МСХ с внутренней звездочкой главного редуктора вертолета [4] со следующими параметрами: $z=18$; $R=0,09$ м; $r_c=0,0675$ м; $l_n=0,0675$ м; $\alpha=7^\circ$; $m=0,035$ кг; $F_c=11,5$ Н; $I_c=5,16 \cdot 10^{-2}$ кг·м²; $f_1=f_3=0,1$; $f_c=0,13$.

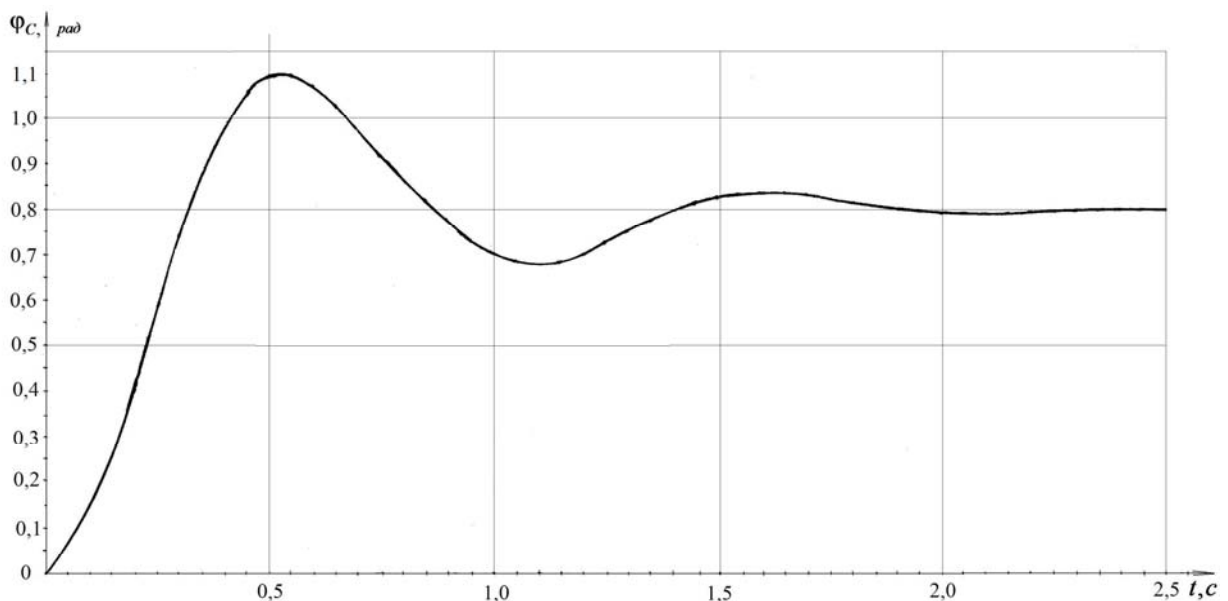


Рис. 2. График изменения φ_c механизма свободного хода с внутренней звездочкой

На рис. 2 приведен график изменения угла поворота сепаратора φ_c для МСХ с внутренней звездочкой от времени t как наиболее общий вариант при различных угловых скоростях звездочки $\omega_2 = 0 \dots 100 \text{c}^{-1}$, угловом ускорении $\varepsilon_2 = 0 \dots 10 \text{c}^{-2}$.

Из графика видно, что сепаратор с роликами совершает колебательное движение относительно звездочки. Качественный характер изменения угла поворота сепаратора показывает, что за незначительный промежуток времени колебательное движение сепаратора с роликами затухает.

Выводы:

1. Движение сепаратора с роликами в свободном ходе МСХ описывается дифференциальным уравнением второго порядка.
2. Решение дифференциального уравнения динамики сепаратора с роликами реализуется лишь численными методами.
3. Для уменьшения износа элементов МСХ в свободном движении необходимо обеспечить бесконтактное движение роликов путем подбора жесткости пружины.

Литература

1. Мальцев В.Ф. Роликовые механизмы свободного хода / В.Ф. Мальцев – М. : Машиностроение, 1968. – 416 с.
2. Пилипенко М. Н. Механизмы свободного хода / Пилипенко М.Н. – М. : Машиностроение, 1966. – 287 с.
3. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко – М. : Машиностроение, 1967. – 316 с.
4. Механические передачи вертолетов / Бушмарин Л.Б., Дементьев П.П., Иоффе Г.И. и др. ; под ред. В.Н. Кестельмана. – М. : Машиностроение, 1983. – 120 с.

Рецензія/Peer review : 7.7.2016 р. Надрукована/Printed : 25.8.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Гладушняк А.К.