

УДК 621.311.004

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ЗАРЯД НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

А. А. Колб

Национальный горный университет, г. Днепропетровск
просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E-mail: aakolb@gmail.com

Обоснованы параметры зарядной цепи диодного выпрямителя в режиме предварительного заряда накопительных конденсаторов в системах группового питания электроприводов, ограничивающих напряжение на конденсаторе на требуемом уровне. Предложен энергосберегающий управляемый способ заряда указанных накопителей. Представлена структурная схема системы автоматического регулирования, обеспечивающая требуемый характер изменения напряжения преобразователя.

Ключевые слова: емкостные накопители, энергосбережение, заряд конденсатора.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ КЕРОВАНИЙ ЗАРЯД НАКОПИЧУВАЛЬНИХ КОНДЕНСАТОРІВ У СИСТЕМАХ ГРУПОВОГО ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

А. А. Колб

Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E-mail: aakolb@gmail.com

Обґрунтовано параметри зарядного кола діодного випрямляча в режимі попереднього заряду накопичувальних конденсаторів у системах групового живлення електроприводів, що обмежують напругу на конденсаторі на необхідному рівні. Запропонований енергозберігаючий керований спосіб заряду зазначених накопичувачів. Представлено структурну схему системи автоматичного регулювання, що забезпечує необхідний характер зміни напруги перетворювача.

Ключові слова: ємнісні накопичувачі, енергозбереження, заряд конденсатора.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одним из перспективных и эффективных направлений энергосбережения средствами промышленного электропривода является применение емкостных накопителей энергии и общих шин постоянного тока с диодными или управляемыми выпрямителями в системах частотно-регулируемого асинхронного привода (рис. 1). В приведенной схеме накопительные конденсаторы аккумулируют избыточную энергию рекуперативного торможения одного или группы двигателей и по цепи постоянного тока (минуя сеть и входной преобразователь) передают другим приводам двигательного режима. При этом исключаются энергооб-

менные процессы между сетью и приводами и, следовательно, дополнительные потери в силовых элементах на входе системы [1].

Наличие силового активного компенсатора (САК) реактивной мощности на базе автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), управляющие параметры которого формируются на основе теории I_d , I_q мгновенной мощности с использованием обобщенных (пространственных) векторов напряжений и токов, позволяет с высокой точностью и быстродействием скомпенсировать неактивные составляющие полной мощности в схемах смешанного питания [2].

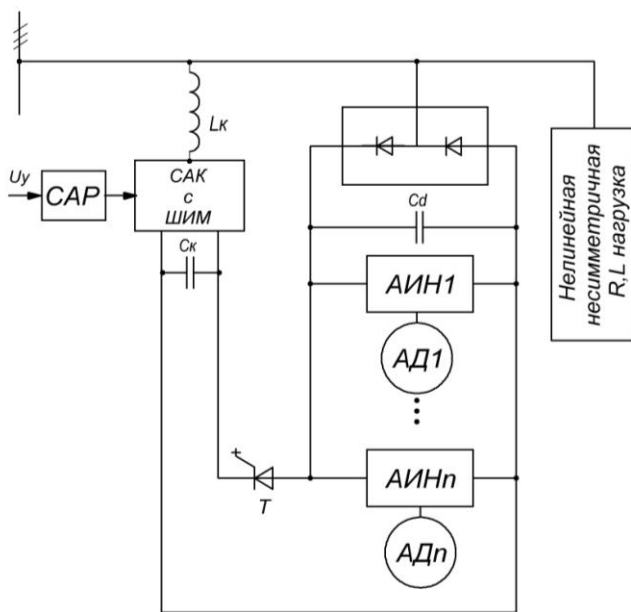


Рисунок 1 – Функциональная схема системы группового питания электроприводов с емкостным накопителем C_d , снабженная силовым активным компенсатором

Таким образом, предлагаемая система позволяет реализовать раздельное и независимое управление приводами и качеством электроэнергии.

Целью данной работы является обоснование параметров зарядной цепи диодного выпрямителя в режиме предварительного заряда накопительных конденсаторов в системах группового питания электроприводов, ограничивающих напряжение на конденсаторе на требуемом уровне, и зарядный ток из условия допустимого тока вентилей, а также предложен энергосберегающий управляемый способ заряда указанных накопителей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В схеме рис. 1 реализуется предварительный заряд одновременно емкостного накопителя C_d и емкости C_k САК. Причем при использовании диодного выпрямителя с целью ограничения зарядного тока необходимо в цепь заряда предварительно включить добавочное сопротивление R_d , (не представленное на рисунке).

На заряд накопительных конденсаторов большой емкости, имеющий длительность, превышающую период питающего напряжения, большое влияние оказывают пульсации выпрямленного напряжения. Это обусловлено тем, что заряд происходит лишь в те моменты, когда приложенное пульсирующее выпрямленное напряжение U_d больше напряжения на конденсаторе U_k . В отрезки времени, когда $U_k > U_d$, появляются паузы, затягивающие процесс заряда. Теоретически процесс заряда заканчивается при условии $U_k = U_{d,max}$ (где $U_{d,max}$ – максимальное значение выпрямленного напряжения).

Процесс заряда можно разделить на два этапа. На первом этапе заряд происходит непрерывно до тех пор, пока $U_k < U_{d,min}$ (где $U_{d,min} = 0,955U_{d,0}$ – минимальное значение пульсирующего выпрямленного напряжения; $U_{d,0} = 1,35U_{2L} = 2,34U_{2f}$ – среднее значение выпрямленного напряжения). На втором этапе, когда $U_k > U_{d,min}$, в зарядном токе появляются паузы, замедляющие рост напряжения U_k . Очевидно, что решающую роль при трехфазной мостовой схеме выпрямления играет первый этап, в течение которого процесс протекает так же, как и при включении цепи на постоянное напряжение. Поэтому, считая, что включение зарядной цепи реализуется на выходе выпрямителя, для расчета зарядного тока и напряжения на конденсаторе можно использовать схему замещения, приведенную на рис. 2, где обозначено: $R_e = 2r_2 + 2k_e^2r_1 + 2r_d + R_d$ (для случая, когда два вентиля одновременно проводят ток); $L_e = 2L_{2\sigma} + 2k_e^2L_{1\sigma}$ – соответственно результирующее активное сопротивление и индуктивность цепи заряда; $r_2 + k_e^2r_1$, $L_{2\sigma} + k_e^2L_{1\sigma}$ – приведенные к цепи выпрямленного тока активные сопротивления и индуктивность рассеяния трансформатора;

r_1 , r_2 , r_d , R_d – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора, динамическое сопротивление вентиля и добавочное сопротивление, включаемое в цепь предварительного заряда; $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора; $k_e = W_2/W_1$ – коэффициент трансформации трансформатора; W_1 , W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

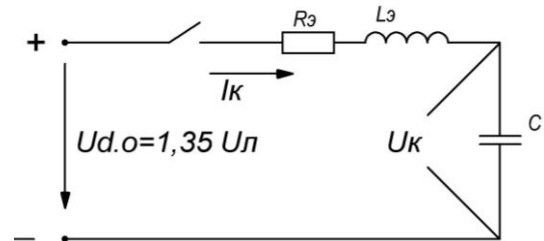


Рисунок 2 – Схема замещения цепи предварительного заряда накопительного конденсатора С

Известно [3], что если $R_e < 2\sqrt{L_e/C}$, возникает колебательный режим заряда, который отличается от аналогичного режима в цепи без выпрямителя, описываемого

$$i_k = \frac{U_{d,0}}{\omega_1 L_e} \sin \omega_1 t e^{-\delta t}; \quad (1)$$

$$u_k = U_{d,0} \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega_1} \cos(\omega_1 t - \beta) \right] e^{-\delta t}, \quad (2)$$

тем, что заряд прекращается, когда зарядный (выпрямленный) ток, вследствие периодического процесса, первый раз обращается в ноль. В приведенных уравнениях (1) и (2) обозначено:

$$\delta = R_e / 2L_e; \quad \omega_1^2 = \frac{1}{L_e C_e} - \left(\frac{R_e}{2L_e} \right)^2 = \omega_0^2 - \delta^2 - \text{частота}$$

затухающих собственных колебаний; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота; $\beta = \arctg \frac{\delta}{\omega_1}$, причем

$$0 < \beta \leq \frac{\pi}{2}.$$

Наличие выпрямителя в цепи заряда приводит к тому, что в указанном колебательном режиме заряда конденсатор заряжается до напряжения $U_{k,max}$, значительно большего $U_{d,max} = 1,045U_{d,0}$, причем при малых затуханиях ($\omega_1 \approx \omega_0$) наибольшее значение зарядного тока близко к $U_{d,0}/\omega_0 L_e = U_{d,0}/\sqrt{L_e/C}$, а наибольшее значение напряжения близко к $2U_{d,0}$ [3].

По указанным причинам добавочное сопротивление R_d , включаемое в цепь на время предварительного заряда накопительных конденсаторов через диодный выпрямитель, должно выбираться из следующих условий.

Во-первых, апериодический заряд реализуется, если $R_e/2L_e > \omega_0$ или $R_e > 2\sqrt{L_e/C}$, откуда, с учетом приведенных выше обозначений,

$$R_d > 2\sqrt{(2L_{2\sigma} + 2k_e^2 L_{1\sigma})/C} - (2r_2 + 2k_e^2 r_1 + 2r_d). \quad (3)$$

Во-вторых, добавочное сопротивление должно ограничивать зарядный ток на допустимом для вентиля уровне с учетом его кратковременной перегрузочной способности. Для этого можно исходить из потерь мощности от зарядного тока i_k .

$$\Delta P = i_{k(t)}^2 R_e; \quad (4)$$

$$i_{k(t)} = (U_{d.0} - u_{k(t)})/R_e, \quad (5)$$

где $i_{k(t)}$ – ток апериодического заряда конденсатора; $u_{k(t)}$ – напряжение на зажимах конденсатора.

Из совместного решения (4) и (5) имеем:

$$\Delta P = (U_{d.0} - u_{k(t)})i_{k(t)}. \quad (6)$$

При этом потери энергии за время t_z заряда конденсатора с учетом того, что $dt = Cdu_k/i_k$,

$$\Delta A = \int_0^{t_z} \Delta P dt = C \int_0^{u_{d.0}} (U_{d.0} - u_{k(t)}) du_k = \frac{CU_{d.0}^2}{2}, \quad (7)$$

соответствуют энергии, запасенной в конденсаторе за время заряда и, следовательно, половине энергии, потребляемой из источника. Отмеченное условие, как известно, не зависит от величины сопротивления в цепи заряда.

Определяя время заряда t_z емкости как отношение величины заряда $Q = CU_{d.0}$ к среднему за время t_z зарядному току $I_{k.sr}$, получим:

$$t_z = CU_{d.0}/I_{k.sr}. \quad (8)$$

Исходя из среднего значения зарядного тока $I_{k.sr}$, можно на основании (7) записать:

$$\frac{CU_{d.0}^2}{2} = I_{k.sr} R_e t_z. \quad (9)$$

Из совместного решения (8) и (9) имеем:

$$R_e = U_{d.0}/2I_{k.sr}. \quad (10)$$

Полагая зарядный ток близким к синусоиде, для которой отношение $I_{max}/I_{sr} = \pi/2$, можно выражение (10) записать в виде

$$R_e = \pi U_{d.0}/4I_{k.max} = \pi U_{d.0}/4\lambda_v I_{n.v}, \quad (11)$$

где $I_{n.v}$, λ_v – номинальный ток вентиля и его перегрузочная способность по току.

Окончательно принимается большее из значений R_e , найденных по (3) и (11).

Для случая предельного апериодического режима заряда конденсатора время, в течение которого ток достигает максимального значения, $t_m = 1/\delta = 2L_e/R_e$. При этом максимальное значение зарядного тока конденсатора определяется как [3]

$$I_{k.max} = \frac{U_{d.0}}{L_e} t_m e^{-\delta t_m} = \frac{2U_{d.0}}{eR_e}, \quad (12)$$

где e – основание натурального логарифма.

Из сопоставления (10) и (12) следует, что для

предельного апериодического режима из энергетических соотношений отношение $I_{k.max}/I_{k.sr} = 1,47$, что близко к синусоиде. Следовательно, можно полагать зарядный ток в рассматриваемых режимах близким к синусоиде.

При одноменном режиме работы приводов группового питания от общих шин постоянного тока снижение потерь энергии от предварительно заряда накопительных конденсаторов может быть достигнуто плавным изменением напряжения. Для этого вместо диодного выпрямителя используется управляемый, который дополнительно может выполнять ряд защитных функций.

Для количественной оценки степени снижения потерь при управляемом заряде накопительных конденсаторов можно рассмотреть процесс включения цепи RC на изменяющееся во времени напряжение

$$TpU_k + u_k = u(t), \quad (13)$$

где $T=R_eC$ – электрическая постоянная цепи заряда.

Наиболее просто управляемый заряд накопительных конденсаторов реализуется путем линейного нарастания напряжения тиристорного преобразователя:

$$u_{pr} = \frac{U_{d.0}}{t_0} t = a_{pr} t \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad \text{где } t_0 \text{ – время нарастания}$$

напряжения преобразователя до установившегося значения $U_{d.0}$; $a_{pr} = U_{d.0}/t_0$ – темп нарастания напряжения преобразователя.

С учетом этого выражение (13) принимает вид:

$$Tpu_k + u_k = a_{pr} t. \quad (14)$$

Так как характеристическое уравнение $Tp+1=0$ имеет один корень, а правая часть (14) является линейной функцией времени, то решение (14) записывается в виде:

$$u_k = A_1 e^{-t/T} + a_{pr} t + A_2. \quad (15)$$

Определяя постоянные интегрирования известным способом, имеем:

$$A_2 = -Ta_{pr}; \quad A_1 = Ta_{pr}.$$

При этом из (15) получаем:

$$u_k = a_{pr} t - Ta_{pr}(1 - e^{-t/T}). \quad (16)$$

Откуда ток заряда конденсатора:

$$i_k = C \frac{du_k}{dt} = Ca_{pr}(1 - e^{-t/T}). \quad (17)$$

На основании приведенных выражений, согласно (6), потери мощности при управляемом заряде конденсаторов:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= i_k(u_{pr} - u_k) = \\ &= CTa_{pr}^2(1 - e^{-t/T})^2 = \\ &= CTa_{pr}^2(1 - 2e^{-t/T} + e^{-2t/T})^2. \end{aligned} \quad (18)$$

На основании (18) потери энергии за время t_0 линейного нарастания напряжения от нуля до $U_{d.0}$:

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= \int_0^{t_0} \Delta P dt = \\ &= CT \frac{U_{d.0}^2}{i_{pr}^2} \int_0^{t_0} (1 - 2e^{-t/T} + e^{-2t/T}) dt = \\ &= \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0} \left(1 - \frac{3T}{2t_0} + \frac{2T}{t_0} e^{-t_0/T} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{T}{2t_0} e^{-2t_0/T} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

В случае $t_0 \gg T$ имеем:

$$\Delta A_1 = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0} \left(1 - \frac{3T}{2t_0} \right). \quad (20)$$

Разлагая в (20) экспоненциальные функции в ряд и ограничиваясь двумя членами ряда (что эквивалентно пренебрежению нелинейным начальным участком изменения напряжения на конденсаторе), имеем:

$$\Delta A_1 = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0}. \quad (21)$$

Второй этап заряда накопительного конденсатора при $t > t_0$ (рис. 3) происходит, когда напряжение преобразователя достигает установившегося значения $U_{d.0}$. Для этого участка, вводя новый отсчет времени от момента $t = t_0$, имеем:

$$U_k' = U_{d.0} \left(-e^{-t/T} \right) + U_{C.0} e^{-t/T}; \quad (22)$$

$$i_k' = I_{C.0} e^{-t/T} = Ca_{pr} e^{-t/T}. \quad (23)$$

На основании приведенных выражений, потери мощности ΔP_2 на втором этапе заряда конденсатора

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= i_k' (U_{d.0} - U_k') = \\ &= Ca_{pr} e^{-t/T} \left[U_{d.0} - U_{d.0} (1 - e^{-t/T}) - U_{C.0} e^{-t/T} \right] = \\ &= Ca_{pr}^2 e^{-2t/T}. \end{aligned} \quad (24)$$

При этом потери энергии на этом этапе заряда конденсатора

$$\Delta A_2 = \int_0^{\infty} \Delta P_2 dt = Ca_{pr}^2 T \int_0^{\infty} e^{-2t/T} dt = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{T^2}{t_0^2}. \quad (25)$$

Суммарные потери энергии

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_1 + \Delta A_2 = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \left(\frac{2T}{t_0} + \frac{T^2}{t_0^2} \right) \quad (26)$$

существенно уменьшаются с уменьшением темпа нарастания напряжения преобразователя (увеличение t_0). При бесконечно медленном нарастании напряжения преобразователя потери энергии стремятся к нулю при любом конечном значении сопротивления в цепи заряда.

Для построения САР, обеспечивающей требуемый характер изменения напряжения преобразователя, запишем уравнение напряжений цепи заряда с учетом обозначений (рис. 2):

$$U_d - U_k = i_k R_e + L_e \frac{di_k}{dt}. \quad (27)$$

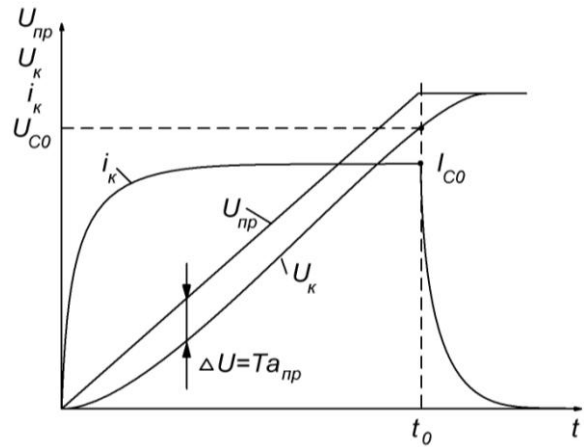


Рисунок 3 – График изменения напряжений преобразователя $U_{пр}$, заряда конденсатора U_k и зарядного тока i_k

Уравнению (27), с учетом $U_k = \frac{1}{C} \int i_k dt$, соответствует структурная схема цепи заряда, представленная на рис. 4.

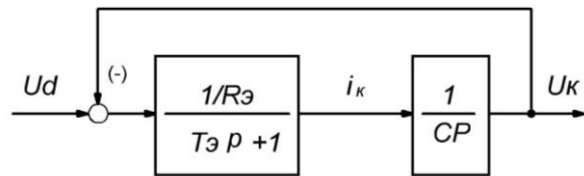


Рисунок 4 – Структурная схема цепи заряда ($T_e = L_e/R_e$)

Для построения САР с использованием принципов подчиненного регулирования нужно использовать два регулятора: регулятор тока (RT) во внутреннем контуре и регулятор напряжения (RN) внешнего контура. При этом структурная схема САР с учетом передаточной функции тиристорного преобразователя в виде апериодического звена

$$W_{pr} = \frac{k_{pr}}{T_{pr} p + 1} \text{ представлена на рис. 5.}$$

Без учета влияния внутренней отрицательной обратной связи по напряжению на емкости U_k , которая может быть скомпенсирована подачей на вход преобразователя положительной обратной связи, равной $U_{os} = U_k/k_{pr}$, передаточные функции регуляторов:

– регулятор тока

$$W_{r,t} = \frac{T_e p + 1}{a_t T_{pr} k_{pr} k_i (1/R_e) p}; \quad (28)$$

– регулятор напряжения

$$W_{r,n} = \frac{Ck_n}{a_n a_t T_{pr} k_n}. \quad (29)$$

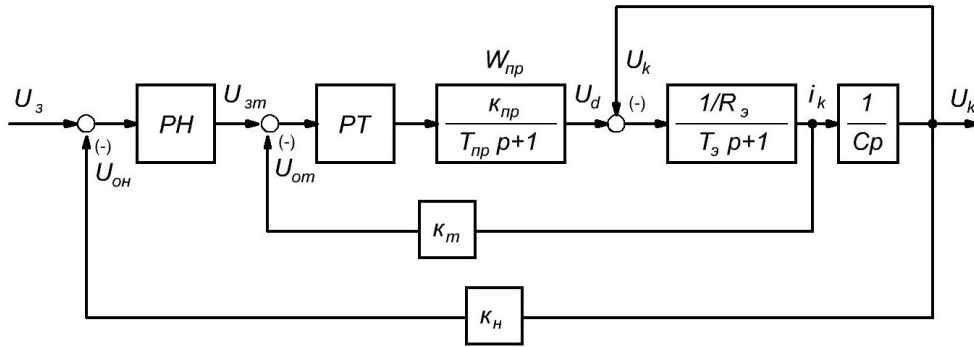


Рисунок 5 – Структурная схема управляемого заряда накопительного конденсатора системы группового питания приводов

В приведенных выражениях обозначено: a_i, a_n – коэффициенты настроек контуров тока и напряжения, принимаемые при настройке на технический оптимум $a_i=a_n=2$; k_i, k_n – коэффициенты обратных связей по току и напряжению.

Для регулирования темпа нарастания напряжения преобразователя и, следовательно, потерь энергии от зарядного тока на входе RN включается датчик интенсивности.

ВЫВОДЫ. Разработана методика определения параметров зарядной цепи накопительных конденсаторов в системах группового питания электроприводов, ограничивающих напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне и зарядный ток на допустимом уровне с учетом перегрузочной способности вентиля по току.

Приведены энергетические соотношения и предложен энергосберегающий управляемый заряд накопительных конденсаторов и САР для реализации этого способа.

THE ENERGY-SAVING GUIDED CHARGE OF STORY CONDENSERS IN SYSTEMS OF GROUP FEED OF ELECTROMECHANICS

A. Kolb

National Mining University, Dnipropetrovsk

ul. K. Marksa, 19, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine. E-mail: aakolb@gmail.com

The parameters of charge chain of diode rectifier are reasonable in the mode of preliminary charge of story condensers in the systems of group feed of electromechanics, limiting voltage on a condenser at required level, and also the energy-saving guided method of charge of the indicated stores is offered. The block diagram of an automatic control system that provides the desired behavior of the voltage converter.

Key words: capacity stores, energy-savings, charge of condenser.

REFERENCES

1. Vorobyev A.A., Kolb A.A. Group with a total power of electric energy storage as a new line of energy saving // *Bulletin of the Kharkov Polytechnic University. Problems of automated electric.* – 2003. – № 10. – PP. 224–228. [in Russian]

2. Kolb A.A. Active power compensators in electric powersystems group // *Bulletin of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University.* – Kremenchuk: KDPU, 2007. – Iss. 3/2007 (44). – Part 2. – PP. 44–48. [in Russian]

3. Bessonov L.A. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering.* – M.: Vyssh. shkola, 1973. – 752 p. [in Russian]

Стаття надійшла 17.02.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Некрасовим А.В.