

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛА АСИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Актуальной задачей является оценка устойчивости узла асинхронной электродвигательной нагрузки при несимметричных провалах напряжения. В работе рассмотрены математические модели асинхронного двигателя, трансформатора и линии для прямой и обратной последовательностей, на основании которых разработаны методика и алгоритмы оценки устойчивости узлов нагрузки. Результаты моделирования показали, что увеличение напряжения обратной последовательности приводит к уменьшению коэффициента запаса устойчивости по напряжению узла асинхронной электродвигательной нагрузки.

**Ключевые слова:** узел асинхронной электродвигательной нагрузки, несимметричный провал напряжения, динамическая устойчивость, коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

Распределительные сети напряжением 6–35 кВ электротехнических комплексов нефтяных месторождений имеют большую протяженность, что приводит к большому количеству нарушений электропитания [1]. Одними из основных потребителей электрической энергии на нефтяных месторождениях являются асинхронные электродвигатели. Согласно статистике [2], в сетях среднего напряжения до 80 % коротких замыканий являются однофазными, что приводит к несимметричным провалам напряжения на шинах нагрузки, которые могут вызвать изменение механических характеристик асинхронных электродвигателей [3], приводит к снижению производительности нефтепромысловых объектов. Таким образом, оценка устойчивости узла асинхронной электродвигательной нагрузки (АЭН) при несимметричных провалах напряжения является актуальной задачей.

Для оценки устойчивости узла АЭН использована математическая модель асинхронного двигателя на основе полных уравнений Парка–Горева [4]. Для учета симметричных составляющих модель включает системы уравнений для прямой и обратной последовательностей. Все системы уравнений составлены относительно синхронно вращающихся осей  $d$ - $q$  в относительных единицах.

Математическая модель прямой последовательности асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} U_{d1} = \frac{d\Psi_{sd1}}{dt} + \Psi_{sq1} \cdot \omega_0 + I_{sd1} \cdot r_s \\ U_{q1} = \frac{d\Psi_{sq1}}{dt} - \Psi_{sd1} \cdot \omega_0 + I_{sq1} \cdot r_s \\ 0 = \frac{d\Psi_{rd1}}{dt} + \Psi_{rq1} \cdot (\omega_0 - \omega) + I_{rd1} \cdot r_r (\omega_0 - \omega) \\ 0 = \frac{d\Psi_{rq1}}{dt} - \Psi_{rd1} \cdot (\omega_0 - \omega) + I_{rq1} \cdot r_r (\omega_0 - \omega) \end{cases} \quad (1)$$
$$\begin{cases} \Psi_{sd1} = x_s \cdot I_{sd1} + x_m \cdot I_{rd1} \\ \Psi_{sq1} = x_s \cdot I_{sq1} + x_m \cdot I_{rq1} \\ \Psi_{rd1} = x_r (\omega_0 - \omega) \cdot I_{rd1} + x_m \cdot I_{d1} \\ \Psi_{rq1} = x_r (\omega_0 - \omega) \cdot I_{rq1} + x_m \cdot I_{q1} \end{cases}$$

где  $I$  — ток;  $\psi$  — потокосцепление; индекс  $d$  относится к продольной оси,  $q$  — к поперечной оси;  $s$  — к обмотке статора,  $r$  — к обмотке ротора;  $x$  — индуктивное сопротивление рассеяния;  $r$  — активное сопротивление;  $x_m$  — сопротивление взаимной индукции;  $t$  — время переходного процесса;  $U$  — напряжение статора;  $\omega$  — частота вращения ротора;  $\omega_0$  — синхронная частота.

Математическая модель обратной последовательности асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} U_{d2} = \frac{d\Psi_{sd2}}{dt} + \Psi_{sq2} \cdot \omega_0 + I_{sd2} \cdot r_s \\ U_{q2} = \frac{d\Psi_{sq2}}{dt} - \Psi_{sd2} \cdot \omega_0 + I_{sq2} \cdot r_s \\ 0 = \frac{d\Psi_{rd2}}{dt} + \Psi_{rq2} \cdot (\omega_0 + \omega) + I_{rd2} \cdot r_r (\omega_0 + \omega) \\ 0 = \frac{d\Psi_{rq2}}{dt} - \Psi_{rd2} \cdot (\omega_0 + \omega) + I_{rq2} \cdot r_r (\omega_0 + \omega) \\ \Psi_{sd2} = x_s \cdot I_{sd2} + x_m \cdot I_{rd2} \\ \Psi_{sq2} = x_s \cdot I_{sq2} + x_m \cdot I_{rq2} \\ \Psi_{rd2} = x_r (\omega_0 + \omega) \cdot I_{rd2} + x_m \cdot I_{d2} \\ \Psi_{rq2} = x_r (\omega_0 + \omega) \cdot I_{rq2} + x_m \cdot I_{q2} \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение движения ротора двигателя с учетом симметричных составляющих

$$T_j \cdot \frac{d\omega}{dt} = \Psi_{q1} \cdot I_{d1} - \Psi_{d1} \cdot I_{q1} - (\Psi_{q2} \cdot I_{d2} - \Psi_{d2} \cdot I_{q2}) - M_c, \quad (3)$$

где  $T_j$  — электромеханическая постоянная времени привода; индекс 1 относится к прямой последовательности, 2 — к обратной последовательности;  $M_c$  — момент сопротивления механизма.

Асинхронные двигатели приводят во вращение насосы, момент сопротивления которых равен:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2, \quad (4)$$

где  $M_n$  — момент сопротивления при номинальной нагрузке;  $M_0$  — момент сопротивления при трогании;  $\omega$  — частота вращения насоса;  $\omega_n$  — номинальная частота вращения насоса.

Для учета кабельной линии и трансформатора использована упрощенная схема замещения, включающая активное и индуктивное сопротивления, соединенные последовательно. Сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы для линий и трансформаторов, поэтому математические модели идентичны [5].

Математическая модель активно-индуктивной ветви относительно синхронно вращающихся осей  $d$ - $q$  имеет вид [4]:

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{U_{1d} - U_{2d}}{x} - \frac{r}{x} \cdot I_d - I_q \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{U_{1q} - U_{2q}}{x} - \frac{r}{x} \cdot I_q + I_d \end{cases}, \quad (5)$$

где  $I$  — ток; индекс  $d$  относится к продольной оси,  $q$  — к поперечной оси;  $x$  — индуктивное сопротивление ветви;  $r$  — активное сопротивление ветви;  $t$  — время переходного процесса;  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения в начале и в конце ветви.

Внешнее возмущение в электрической сети моделировалось одноступенчатым провалом напряжения. При этом эквивалентная ЭДС системы электроснабжения скачкообразно изменялась до значения остаточного напряжения и оставалась неизменной на протяжении всего возмущения, после чего мгновенно принимала первоначальное значение. Воздействия такого типа моделировались независимо в каждой фазе сети для получения несимметричного провала напряжения с учетом следующих ограничений [6–8]:

1. Напряжение послеаварийного режима не превысит доаварийное значение.

2. Напряжение обратной последовательности не превысит значение напряжения прямой последовательности.

Основными характеристиками устойчивости узла АЭН являются границы статической и динамической устойчивости и коэффициент запаса устойчивости по напряжению. Граница статической устойчивости показывает зависимость напряжения статической устойчивости прямой последовательности от напряжения обратной последовательности [6]. Граница динамической устойчивости представляет собой зависимость допустимой длительности провала напряжения от его глубины [6].

Для оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла АЭН нефтяных месторождений необходимо определить границу статической устойчивости, затем найти границу динамической устойчивости, которая позволит рассчитать коэффициент запаса устойчивости по напряжению.

Для построения границы статической устойчивости узла АЭН рассчитывается напряжение статической устойчивости при симметричном провале напряжения. Далее в электрической сети моделируется несимметричное возмущающее воздействие с напряжением прямой последовательности равным напряжению статической устойчивости при симметричном провале напряжения и небольшим значением напряжения обратной последовательности, которое зависит от требуемой точности расчета, с учетом рассмотренных выше ограничений. На следующем этапе с помощью математической модели узла АЭН определяется нарушится ли статическая устойчивость при заданном возмущении. Если статическая устойчивость нарушается, то значение напряжения прямой последовательности увеличивается, если статическая устойчивость не нарушается, то параметры возмущающего воздействия сохраняются, затем увеличивается напряжение обратной последовательности и расчет повторяется (рис. 1).

Для определения границы динамической устойчивости узла АЭН в электрической сети моделируется несимметричный одноступенчатый провал напряжения заданной глубины и длительности. По математической модели питания узла АЭН рассчитывается выбег асинхронных двигателей при заданном провале напряжения, затем при восстановлении напряжения определяется возможность самозапуска электродвигателей.

Если самозапуск успешный, то увеличивается длительность провала напряжения и расчет повторяется. Если самозапуск не успешный, то параметры возмущающего воздействия сохраняются и изменяется глубина провала напряжения, расчет повторяется (рис. 2).

Коэффициент запаса устойчивости по напряжению определяется по выражению [9]:

$$k = \frac{S_{ycm}}{S_{обц}}, \quad (6)$$

где  $S_{ycm}$  — площадь области устойчивой работы, ограниченная границей динамической устойчивости и единицей по оси напряжения;  $S_{обц}$  — площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и временем ввода резерва  $t_{nr}$  по оси длительности провала напряжения.

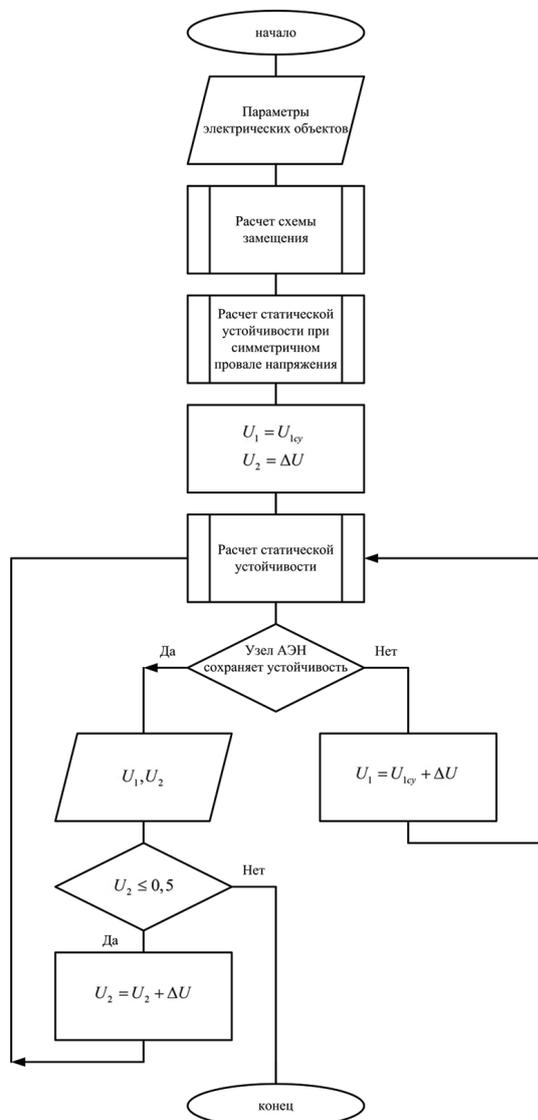


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета границы статической устойчивости узла АЭН

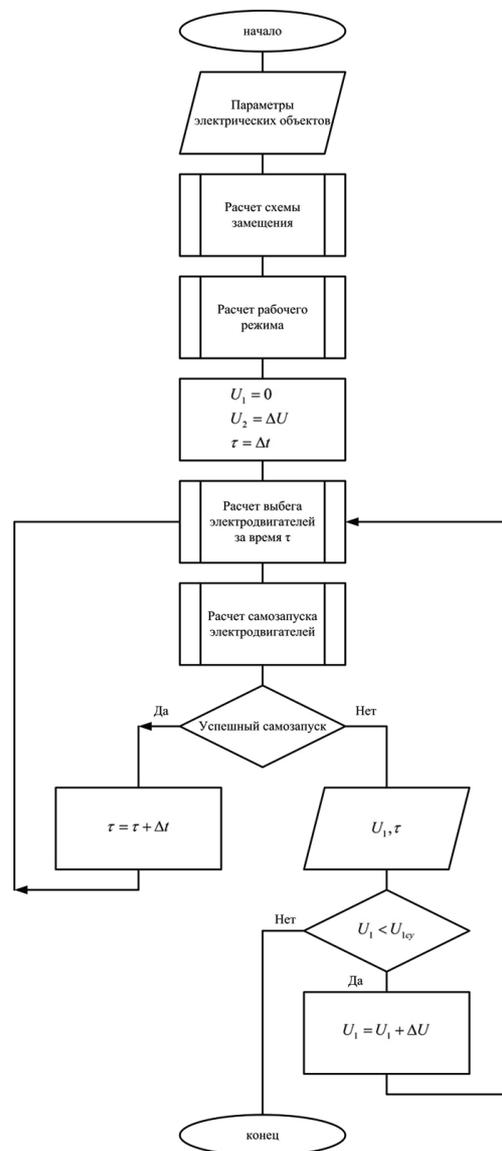


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета границы динамической устойчивости узла АЭН

Оценка устойчивости производилась для типового узла нагрузки кустовой насосной станции, включающего три асинхронных двигателя типа АРМ-315/6-2, работающих с одинаковыми нагрузками (рис. 3). Питание узла осуществляется от трансформатора ТМН-2500/35, двигатели подключены с помощью кабеля АПВВнг(А)-LS 3х25-6 длиной 250 метров. Математическая модель (1) – (5), включающая дифференциальные и алгебраические уравнения, реализована в программном пакете Mathcad 15.0. Дифференциальные уравнения систем (1) – (3), (5) решались методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Алгебраические уравнения систем (1), (2) решались матричным методом на каждом шаге интегрирования.

Для узла нагрузки АЭН получена граница статической устойчивости (табл. 1), которая показывает, что при увеличении напряжения обратной последовательности на 10 % увеличивается напряжение статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5 %. Данное явление связано с увеличением момента обратной последовательности.

По рассмотренному выше алгоритму были построены границы динамической устойчивости узла

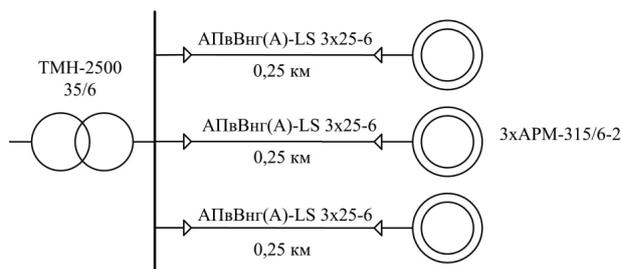


Рис. 3. Типовая однолинейная схема питания узла АЭН кустовой насосной станции

нагрузки АЭН при различных значениях напряжения обратной последовательности (рис. 4). Увеличение напряжения обратной последовательности на 10 % приводит не только к увеличению напряжения статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5 %, но и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения в среднем на 8,6 %. Данное явление снижает коэффициент запаса устойчивости по напряжению, при симметричном провале напряжения коэффициент

Граница статической устойчивости для узла нагрузки с асинхронными двигателями типа АРМ-315/6-2

Напряжение обратной последовательности $U_{2'}$ о.е.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Напряжение статической устойчивости прямой последовательности $U_{1cy'}$ о.е.	0,623	0,631	0,655	0,692	0,741	0,8

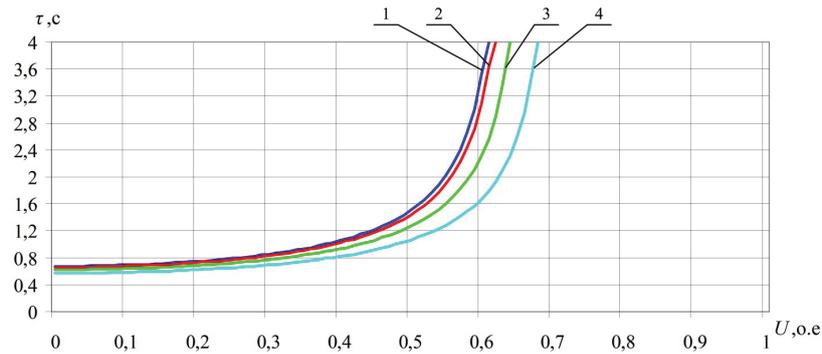


Рис. 4. Границы динамической устойчивости узла нагрузки с асинхронными двигателями типа АРМ-315/6-2:  
 1 — при симметричном провале напряжения;  
 2 — при напряжении обратной последовательности 0,1 о.е.;  
 3 — при напряжении обратной последовательности 0,2 о.е.;  
 4 — при напряжении обратной последовательности 0,3 о.е.

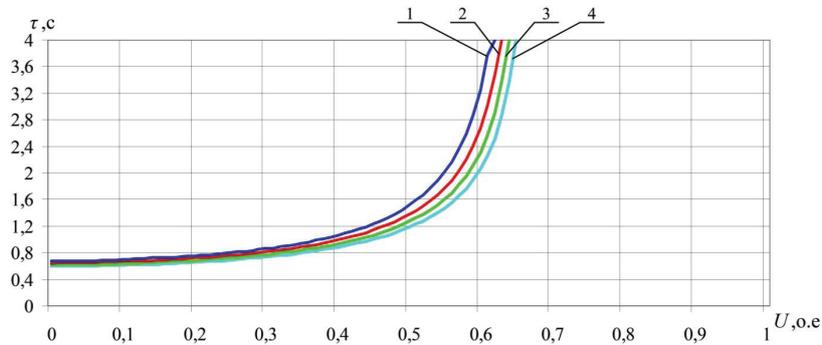


Рис. 5. Границы динамической устойчивости узла нагрузки с асинхронными двигателями типа АРМ-315/6-2:  
 1 — при загрузке 70 %; 2 — при загрузке 80 %;  
 3 — при загрузке 90 %; 4 — при загрузке 100 %

запаса максимален  $k_m$ , при напряжении обратной последовательности равном 0,1 о.е. —  $0,98k_m$ , при 0,2 о.е. —  $0,94k_m$ , при 0,3 о.е. —  $0,87k_m$ .

При симметричных провалах напряжения нагрузка асинхронного двигателя влияет на границу динамической устойчивости. Уменьшение нагрузки двигателя приводит к уменьшению напряжения статической устойчивости и увеличению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости [10, 11]. Для оценки влияния нагрузки на границу динамической устойчивости при несимметричных возмущающих воздействиях проведено моделирование для узла АЭН при различных значениях коэффици-

ента загрузки и напряжении обратной последовательности равным 0,2 о.е. (рис. 5). При моделировании нагрузка всех двигателей изменялась одинаково для получения общих зависимостей. Границы динамической устойчивости показывают, что увеличение нагрузки асинхронных двигателей на 10 % при несимметричном провале напряжения приводит к увеличению напряжения статической устойчивости в среднем на 0,8 % и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения в среднем на 5,8 %. Следовательно, нагрузка асинхронных двигателей влияет на расходование запасенной кинетической энергии из электрического привода вне зависимости от вида возмущающего воздействия.

**Выводы**

1. Предложены методика и алгоритмы для построения границ статической и динамической устойчивости для узла асинхронной электродвигательной нагрузки при несимметричных провалах напряжения в электрических сетях нефтяных месторождений.

2. В узле асинхронной электродвигательной нагрузки при несимметричных возмущающих воздействиях увеличение напряжения обратной последовательности на 10 % приводит к увеличению напряжения статической устойчивости прямой последовательности в среднем на 3,5 %, кроме того, уменьшается допустимая длительность провала напряжения в среднем на 8,6 % и, соответственно, уменьшается коэффициент запаса устойчивости по напряжению в среднем на 4,3 %.

3. Увеличение загрузки асинхронных двигателей на 10% при несимметричных провалах напряжения приводит к увеличению напряжения статической устойчивости в среднем на 0,8 % и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости в среднем на 5,8 %.

**Библиографический список**

1. Мартыанов А. С., Сушков В. В., Небилович И. С. Кратковременные нарушения электроснабжения в электрических сетях нефтяных месторождений // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Нижневартовск, 2016. С. 123–26.
2. Неклепаев Б. Н., Востросаблин А. А. Вероятностные характеристики коротких замыканий в энергосистемах // Электричество. 1999. № 8. С. 15–23.
3. Суворов И. Ф., Романова В. В., Хромов С. В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16, № 3. С. 72–83. DOI: 10.14529/power160309.
4. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 11-е изд., пер. и доп. М.: Юрайт, 2014. 701 с. ISBN 978-5-9916-2562-3.
6. Ершов М. С., Егоров А. В., Трифонов А. А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: Издат. дом Недра, 2010. 319 с. ISBN 978-5-8365-0372-7.

7. Ершов М. С., Егоров А. В., Комков А. Н. Влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных двигателей // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2012. № 1 (266). С. 117–128.

8. Ершов М. С., Егоров А. В., Валов Н. В., Комков А. Н. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем // Промышленная энергетика. 2011. № 9. С. 22–24.

9. Егоров А. В., Новоселова Ю. В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. 2000. № 11. С. 24–27.

10. Абрамович Б. Н., Устинов Д. А., Поляков В. Е. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2010. № 9. С. 104–106.

11. Лосев Ф. А., Мартьянов А. С., Сушков В. В. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2017. С. 303–306.

**ЛОСЕВ Федор Алексеевич**, ассистент кафедры «Электроэнергетика» Тюменского индустриального университета.

SPIN-код: 3279-4792

AuthorID (РИНЦ): 823006

Адрес для переписки: fedor\_los@mail.ru

**СУШКОВ Валерий Валентинович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Энергетика» Нижневартовского государственного университета.

SPIN-код: 1060-8949

AuthorID (РИНЦ): 446636

AuthorID (SCOPUS): 55971218900

Адрес для переписки: sushkovvv@gray-nv.ru

**Для цитирования**

Лосев Ф. А., Сушков В. В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98.

Статья поступила в редакцию 03.06.2018 г.

© Ф. А. Лосев, В. В. Сушков