

Гринкруг М. С., Новгородов Н. А.
M. S. Grinkrug, N. A. Novgorodov

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМИ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ С УЧЁТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕЁ НАГРУЗКИ**

**DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM OF THE DIESEL POWER PLANT CONTROL
SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE UNIFORMITY OF ITS LOAD**

Гринкруг Мирон Соломонович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: grin@knastu.ru.

Miron S. Grinkrug – PhD in Engineering, Associate Professor, General Physics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: grin@knastu.ru.

Новгородов Никита Александрович – старший преподаватель кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: nikitakms@yandex.ru.

Nikita A. Novgorodov – Senior Lecturer, General Physics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave. 27. E-mail: nikitakms@yandex.ru.

Аннотация. В статье представлен алгоритм работы системы управления дизель-генераторами на дизельной электростанции, позволяющий снизить потери топлива на выработку электроэнергии с учётом неравномерности нагрузки электростанции. Рассмотрены функции прогнозирования изменения мощности нагрузки, определения времени включения ДГ на примере трёхгенераторной дизельной электростанции.

Summary. The article presents an operation algorithm for the diesel generators control system at a diesel power plant, which allows to reduce power generation fuel losses, taking into account the uneven load of the power plant. The functions of predicting changes in load power, determining the time of diesel generator switching on are considered using the example of a three-generator diesel power plant.

Ключевые слова: дизельная электростанция, дизель-генератор, система управления, алгоритм, нагрузка.

Key words: diesel power plant, diesel generator, control system, algorithm, load.

УДК 621.311.236

На территории Дальневосточного региона располагается большое количество малых населённых пунктов, удалённых от районных центров на сравнительно большое расстояние [1]. Электроснабжение этих населённых пунктов зачастую осуществляется от дизельных электростанций (ДЭС) с одним или несколькими дизель-генераторами (ДГ) в своём составе. Топливо, необходимое для работы ДЭС, постоянно растёт в стоимости. В себестоимости электроэнергии затраты на топливо составляют от 60 до 80 %, поэтому в настоящее время цена электроэнергии доходит до 70 рублей за кВт·ч и постоянно растёт. Вследствие этого проблема снижения расхода топлива, необходимого для выработки электроэнергии, является актуальной. В настоящее время основные расходы топлива на ДЭС происходят в дизель-генераторах. Максимальный КПД дизель-генератора может достигать 40 %. Такие параметры, как правило, достигаются при номинальной нагрузке ДГ. При снижении нагрузки ДГ его КПД падает, а расход топлива, необходимого для выработки электроэнергии, возрастает.

Согласно исследованию [2], нагрузки ДЭС могут меняться в диапазоне 20...100 % от максимальной мощности нагрузки и ниже. По этой причине дизель-генераторы работают при неоптимальных режимах, вызывающих рост расхода топлива на производство электрической энергии [4].

В дополнение к этому неоптимальный выбор необходимых мощностей ДГ или работа нескольких ДГ одного типа на общую нагрузку может только усугубить проблему роста расхода топлива [5; 6; 7; 8; 9; 10].

Изменения удельного расхода топлива в зависимости от нагрузки ДГ [3] описывается формулами

$$\bar{g} = 0,0811 \cdot (\bar{P})^{-1,385} + 0,912; \quad \bar{P} = \frac{P}{P_{\text{ном}}}; \quad \bar{g} = \frac{g}{g_{\text{ном}}},$$

где \bar{P} – суммарная относительная мощность дизель-генератора; P – текущее значение суммарной мощности дизель-генератора, кВт; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность дизель-генератора, кВт; \bar{g} – относительный удельный расход ДГ; g – текущее значение удельного расхода топлива ДГ на выработку электроэнергии, кг/кВт·ч; $g_{\text{ном}}$ – номинальное значение удельного расхода топлива ДГ на выработку электроэнергии при мощности нагрузки, равной номинальной мощности ДГ, кг/кВт·ч.

В работе [2] была рассмотрена методика ступенчатого переключения ДГ на примере двухгенераторной ДЭС с учётом времени, требуемого для разогрева двигателей ДГ. Для осуществления переключения из условия снижения расхода топлива рассчитывались мощности нагрузок дизель-генераторов малой и большой мощности. На всём диапазоне изменения нагрузки было выделено три участка, разделённых расчётными значениями мощности нагрузки P_n : $P_{\text{кр1}}$ – мощность нагрузки, при которой равны удельные расходы топлива обоих дизель-генераторов; $P_{\text{кр2}}$ – мощность нагрузки, при которой расход топлива в случае работы одного дизель-генератора равен расходу топлива при работе обоих дизель-генераторов на ту же нагрузку.

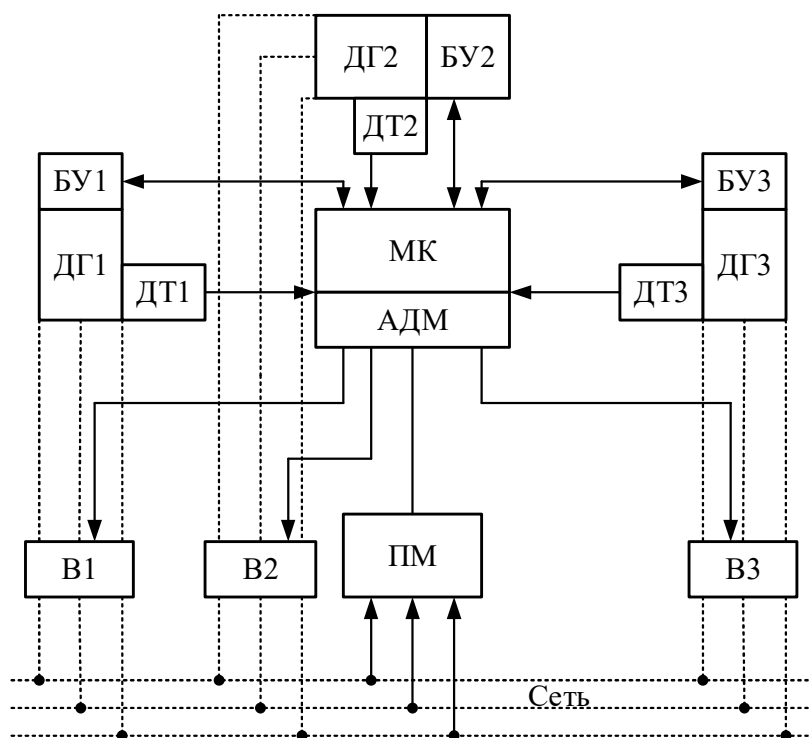
Все переключения в схеме производятся с выдержкой времени, необходимой для разогрева двигателей соответствующих дизель-генераторов, которая определяется с учётом фактической температуры двигателя и нормальной эксплуатационной температуры двигателя.

Там же [2] приведена блочная схема системы управления дизель-генераторами, содержащая блоки управления работой дизель-генераторов, датчики температуры двигателей, микроконтроллер, преобразователь мощности нагрузки и выключатели, коммутирующие дизель-генераторы к сети электроснабжения. На каждом этапе работы системы управления микроконтроллер определяет необходимость коммутации ДГ в сеть и количество ДГ, работающих на полную нагрузку.

Когда нагрузка ДЭС мала ($P_n < P_{\text{кр1}}$) и отсутствует тенденция к её увеличению ($\frac{dP_n}{dt} < 0$), в работе находится ДГ меньшей мощности. При росте нагрузки ($\frac{dP_n}{dt} > 0$) определяется момент времени коммутации ДГ большей мощности $t_{д1}$ с учётом фактической температуры второго двигателя. При дальнейшем увеличении нагрузки в области $P_{\text{кр1}} < P_n < P_{\text{кр2}}$ возможен случай спада и роста мощности нагрузки. В соответствии с этим определяются моменты коммутации $t_{д2}$ (при снижении нагрузки и возврате в область $P_n < P_{\text{кр1}}$) и $t_{д3}$ (при росте мощности нагрузки). При большой нагрузке ДЭС, когда $P_n > P_{\text{кр2}}$, но $\frac{dP_n}{dt} < 0$, включаются в работу оба ДГ и определяется $t_{д4}$ – момент времени коммутации при снижении нагрузки и возврате во вторую область.

Данная схема управления ДГ не учитывает возможность прогнозирования изменений мощности нагрузки за счёт использования расчётных методов и современных средств фиксации параметров электрооборудования, таких как микропроцессорные реле, регистраторы энергетических параметров и т.д. Для более оптимального снижения потерь от неравномерности нагрузки целесообразно также увеличить число дизель-генераторов на электростанции до трёх. По полученным данным [3] при максимальной мощности нагрузки свыше 1800...2000 кВт целесообразна установка на ДЭС трёх дизель-генераторов. Это позволяет экономить более 10 % топлива в год. Данная работа посвящена разработке системы управления трёхгенераторной ДЭС с учётом прогнозирования изменения нагрузки.

На рис. 1 приведена схема управления тремя дизель-генераторами ДЭС, включающая датчики температуры для каждого из трёх ДГ и микроконтроллер с архивом данных о предыдущих переключениях.



ДГ1 – дизель-генератор меньшей мощности; ДГ2 – дизель-генератор средней мощности; ДГ3 – дизель-генератор большей мощности; ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики температуры дизель-генераторов; МК – микроконтроллер; АДМ – архив данных микроконтроллера; ПМ – преобразователь мощности; В1, В2, В3 – выключатели нагрузки; БУ1, БУ2, БУ3 – блоки управления дизель-генераторов

Рис. 1. Блочная схема системы управления ДГ

Данная схема работает по следующему принципу. При малых нагрузках работает ДГ меньшей мощности. При росте нагрузки последовательно подключаются ДГ большей мощности, а ДГ меньшей мощности отключаются. В дальнейшем при повышении нагрузки происходит последовательное подключение пар ДГ, и при больших нагрузках, близких к максимальным, работают все три ДГ.

Для расчёта новых моментов времени коммутации ДГ с учётом их текущей температуры необходимо спрогнозировать изменение нагрузки ДЭС во времени. При работе ДЭС с тремя генераторами на меняющуюся нагрузку возможно в общем случае семь различных сочетаний работы ДГ:

1. работает только первый генератор малой мощности ДГ1 ($P_n < P_{кр1}; P_n < P_{ДГ1ном}$);
2. работает только второй генератор средней мощности ДГ2 ($P_n < P_{кр2}; P_n < P_{ДГ2ном}$);
3. работает только третий генератор большой мощности ДГ3 ($P_n < P_{кр3}; P_n < P_{ДГ3ном}$);
4. работают в паре генераторы ДГ1 и ДГ2 ($P_n < P_{кр4}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ2ном}$);
5. работают в паре генераторы ДГ1 и ДГ3 ($P_n < P_{кр5}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ3ном}$);
6. работают в паре генераторы ДГ2 и ДГ3 ($P_n < P_{кр6}; P_n < P_{ДГ2ном} + P_{ДГ3ном}$);
7. работают все генераторы ДГ1, ДГ2, ДГ3 на всю нагрузку ($P_n > P_{кр6}; P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ2ном} + P_{ДГ3ном}$).

$P_n < P_{ДГ1ном} + P_{ДГ2ном} + P_{ДГ3ном}$.

Значения мощностей переключений ДГ $P_{кр1}, P_{кр2}, P_{кр3}, P_{кр4}, P_{кр5}, P_{кр6}$ определяются из следующих условий:

1. $P_{кр1}$ – мощность нагрузки, при которой равны расходы топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ1 и ДГ2;

2. $P_{кр2}$ – мощность нагрузки, при которой расходы топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ2 и ДГ3, равны;

3. $P_{кр3}$ – мощность нагрузки при которой расход топлива, необходимого для производства электроэнергии ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ1 и ДГ2;

4. $P_{кр4}$ – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ1 и ДГ2, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ1 и ДГ3;

5. $P_{кр5}$ – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ1 и ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе ДГ2 и ДГ3;

6. $P_{кр6}$ – мощность нагрузки, при которой суммарный расход топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе ДГ2 и ДГ3, равен суммарному расходу топлива при работе всех генераторов ДЭС.

Методика определения $P_{кр1}$, $P_{кр2}$, $P_{кр3}$, $P_{кр4}$, $P_{кр5}$ приведена в [3]. Исходными данными для этих расчётов являются номинальные значения мощностей и удельных расходов ДГ. Аналогичным способом может быть получена и формула для определения $P_{кр6}$. Она определяется из следующего уравнения, которое выражает условие равенства расходов топлива, необходимого для производства электроэнергии при работе двух ДГ и трёх ДГ:

$$\frac{g_{ном1}P_{ном1} + g_{ном2}P_{ном2}}{P_{ном1} + P_{ном2}} \cdot \left[c + a \cdot \left(\frac{P_{кр6}}{P_{ном1} + P_{ном2}} \right)^b \right] =$$
$$= \frac{g_{ном1}P_{ном1} + g_{ном2}P_{ном2} + g_{ном3}P_{ном3}}{P_{ном1} + P_{ном2} + P_{ном3}} \cdot \left[c + a \cdot \left(\frac{P_{кр6}}{P_{ном1} + P_{ном2} + P_{ном3}} \right)^b \right],$$

где $a = 0,0811$; $b = -1,385$; $c = 0,912$ – постоянные коэффициенты аппроксимации, полученные в [3].

Мощность нагрузки P_n фиксируется блоком преобразователя мощности нагрузки, в котором содержатся датчики тока нагрузки по каждой фазе отходящей от ДЭС линии и микроконтроллер для расчёта мощности нагрузки по каждой фазе ДЭС и суммарной нагрузки ДЭС. Значения нагрузок фиксируются за определённый период времени и сопоставляются с прогнозными, которые либо рассчитываются по формулам, либо берутся из архива данных МК. Текущая температура ДГ T_ϕ замеряется соответствующими датчиками температуры, установленными на каждом генераторе. Время разогрева двигателей соответствующих ДГ определяется согласно следующему уравнению:

$$t_p = \Delta t_n - \frac{\Delta t_n}{\Delta T_{норм}} \cdot T_\phi, \quad (1)$$

где T_ϕ – фактическая температура дизель-генератора, °С; $\Delta T_{норм}$ – разность температур, необходимая для прогрева ДГ до нормальной температуры эксплуатации, °С; Δt_n – время, за которое текущая мощность нагрузки достигнет мощности, при которой необходимо переключаться на другую комбинацию ДГ.

Микроконтроллер МК осуществляет функции:

1. реализации общего алгоритма работы системы управления;
2. использования в алгоритме и сохранения в архиве данных значений токов нагрузки по каждой фазе ДЭС (текущая нагрузка ДЭС), получаемых от блока преобразователя мощности ПМ;
3. организации прогнозирования изменения мощности нагрузки за счёт использования данных (заложенных в программу МК) суточных, сезонных и годовых типовых графиков нагрузки ДЭС или архива данных за предыдущие периоды работы системы (при их наличии);
4. осуществления предварительного разогрева двигателей, подключаемых к нагрузке ДГ, за счет расчёта времени, требуемого на разогрев, и моментов времени коммутации выключателей ДГ;
5. исключения возможности появления аварийных режимов (перегрузка ДГ);

6. сигнализации о режимах работы ДЭС оперативному персоналу.

На основании схемы (см. рис. 1) можно организовать алгоритм управления, заключающийся в следующем:

1. При небольшом уровне нагружения ДЭС ($P_n < P_{кр1}$) ДГ1 работает на всю нагрузку, выключатель В1 при этом включён, а выключатели В2 и В3 отключены. Данные об уровне текущей нагрузки ДЭС с преобразователя мощности ПМ поступают на вход МК, в программу которого уже введены значения времени разогрева дизель-генераторов ДГ1 – $t_{р1}$, ДГ2 – $t_{р2}$ и ДГ3 – $t_{р3}$, найденные по формуле (1). В момент времени, когда расчётное (спрогнозированное) время $\Delta t_n = t_{р2}$, начинается разогрев двигателя генератора средней мощности ДГ2.

2. В момент времени, когда необходимо включить в работу второй генератор, т.е. когда $P_n = P_{кр1}$ и есть устойчивая тенденция к росту нагрузки $\frac{dP_n}{dt} > 0$, ДГ2 уже разогрет до требуемой температуры, сигнал его готовности к принятию нагрузки поступает на аналоговые входы МК. Микроконтроллер подаёт сигналы: на включение выключателя В2, а затем с выдержкой времени сигнал на отключение выключателя В1 и сигнал к БУ1 на остановку ДГ1 (на всю нагрузку работает ДГ2). Когда спрогнозированное значение $\Delta t_n = t_{р3}$, начинается разогрев двигателя генератора большой мощности ДГ3.

3. Если блоком ПМ фиксируется дальнейший рост нагрузки $\frac{dP_n}{dt} > 0$ и в архиве данных МК имеется устойчивая тенденция к росту нагрузки (за предыдущие периоды измерений) вплоть до уровня $P_n = P_{кр2}$, ДГ3 включается в работу за счёт подачи сигнала от МК к БУ3 и сигнала с выдержкой времени к выключателю В3. После этого подаются сигналы на отключение ДГ2, а затем с выдержкой времени – на отключение его выключателя нагрузки В2. На всю нагрузку работает ДГ3 большой мощности.

4. Если рост текущей нагрузки продолжается, прогнозное значение мощности нагрузки растёт, тогда при $\Delta t_n = t_{р1} + t_{р2}$ необходимо начать разогрев двигателей ДГ1 и ДГ2. Когда мощность нагрузки достигает значения $P_n = P_{кр3}$, МК подаёт сигналы к БУ1 и БУ2 на включение ДГ1, ДГ2 и с выдержкой времени сигналы на включение В1 и В2, а затем сигнал на отключение ДГ3 и выключателя В3. В работе на всю нагрузку остаётся пара ДГ1 и ДГ2.

5. Если текущая нагрузка ДЭС продолжает расти вместе с прогнозным значением мощности нагрузки, фиксируется значение $\Delta t_n = t_{р3}$, при превышении которого необходимо начать разогрев двигателя ДГ3. Когда мощность нагрузки равна $P_n = P_{кр4}$, подаются сигналы к БУ3 на включение ДГ3, затем сигнал на включение В3, сигнал к БУ2 на отключение ДГ2 и сигнал на отключение В2. В работе на всю нагрузку находится пара ДГ1 и ДГ3.

6. При дальнейшем росте текущей нагрузки и получении данных об устойчивом росте прогнозной нагрузки фиксируется равенство $\Delta t_n = t_{р2}$, требуемое для разогрева ДГ2. Если мощность нагрузки превосходит значение $P_n = P_{кр5}$, МК подаёт сигналы к БУ2 на включение ДГ2 (в этот момент его двигатель полностью разогрет). Затем поступает сигнал на включение выключателя В2 и с выдержкой времени сигнал к БУ1 на отключение ДГ1 и к В1 на его отключение. В результате в работе на этом участке находятся генераторы ДГ2 и ДГ3.

7. Если нагрузка ДЭС продолжает расти вплоть до максимальной, фиксируется значение $\Delta t_n = t_{р1}$, требуемое для разогрева ДГ1. В момент времени, когда мощность нагрузки преодолевает значение $P_n = P_{кр6}$, МК посылает сигнал к БУ1 на включение ДГ1, затем с выдержкой времени поступает сигнал на включение выключателя В1. В результате в работе на последнем участке находятся все три генератора.

В случае фиксации снижения текущей мощности нагрузки или устойчивого падения прогнозного значения мощности нагрузки $\frac{dP_n}{dt} < 0$ на каком-либо участке все перечисленные операции алгоритма выполняются в обратном порядке с учётом расчётного времени разогрева ДГ.

В результате работы данного алгоритма системы управления реализуются ступенчатое управление мощностью ДЭС и более точная подстройка под изменение её нагрузки, а значит, и большее снижение расхода топлива, необходимого для выработки электроэнергии каждым дизель-генератором.

Заключение

В данной работе рассмотрен алгоритм работы системы управления коммутацией ДГ на трёх-генераторной ДЭС с учётом неравномерности её нагрузки. За счет выбора оптимальных режимов работы дизель-генераторов с реализацией функции прогнозирования изменения мощности нагрузки ДЭС и определения моментов времени коммутации ДГ на нагрузку, более точного распределения мощности нагрузки по трём ДГ достигается снижение суммарного расхода топлива, затрачиваемого на производство электроэнергии ДЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов, А. А. Системы электроснабжения на базе автономных установок / А. А. Громов, В. Л. Колякин, А. С. Толочкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 4-9.
2. Новгородов, Н. А. Управление дизель-генераторами дизельных электростанций с учётом изменения нагрузки электростанции / Н. А. Новгородов, М. С. Гринкруг, Ю. И. Ткачева // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1-2. – С. 45-50.
3. Гринкруг, Я. С. Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Гринкруг Яков Соломонович. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – 171 с.
4. Майорова, Ю. А. Способы снижения потребления топлива дизельными электростанциями / Ю. А. Майорова, Е. В. Пашук, Н. Н. Смокталь // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 77-87.
5. Лобов, М. Ю. Некоторые особенности выбора и эксплуатации электроагрегатов и электростанций с двигателями внутреннего сгорания в современных условиях / М. Ю. Лобов // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2016. – Т. 1. – № 1 (2). – С. 96-104.
6. Рамадан, А. Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB Simulink / А. Рамадан, Р. С. Денисов // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 3 (39). – С. 11-20.
7. Сопот, В. Н. Дизельные двигатели отечественного производства для ВВСТ / В. Н. Сопот, В. П. Булай, И. О. Тимофеев // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2019. – № 2 (12). – С. 237-260.
8. Takahashi, R. Stability Enhancement of Small-Scale Power Grid with Renewable Power Sources by Variable Speed Diesel Power Plant / R. Takahashi, A. Umemura, J. Tamura // Journal of Power and Energy Engineering. – 2020. – Vol. 8. – P. 1-17.
9. Особенности построения автономной ветро-дизельной системы электроснабжения объектов с электроприёмниками разного типа / Е. Т. Ербаев, И. И. Артюхов, С. Ф. Степанов, С. В. Молот // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 121.
10. Ершов, С. В. Перспективные схемы ветро-дизельных установок / С. В. Ершов, С. О. Смолин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 49-54.