

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.148>

Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции

С.В. Попов¹

О.А. Бурмакин¹

Ю.С. Малышев¹

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Анализ электростанций ряда пассажирских судов показал необходимость обеспечения параллельной работы дизель-генераторов (ДГ) ранее работавших раздельно. Установленные ДГ предназначены только для автономной работы, и не предполагают введения статизма в характеристики генераторов. Целью работы является обоснование и реализация рабочего состояния судовых электростанций в соответствии с действующими требованиями Российского Речного Регистра (РРР), предполагающими устойчивую параллельную работу ДГ. Эксплуатация установленных дизелей показала сложность точного регулирования механических характеристик, связанную со спецификой работы механических регуляторов частоты вращения (РЧВ), установленных на двигатели. Для определения качества механического РЧВ разработаны функциональные и структурные схемы системы стабилизации частоты вращения приводного двигателя с механическим регулятором, на основании которых получена передаточная функция и сделан вывод о неустойчивости работы регулятора при больших значениях люфтов в механической передаче. Достижение поставленной цели возможно путем замены механического РЧВ на электронный с актуатором, что подтверждено математическим анализом соответствующих систем регулирования. Передаточные функции систем регулирования получены на основе разработанных структурных и функциональных моделей. Электронные регуляторы, выполненные по представленным схемам, внедрены на ряде судовых дизель-генераторных установок и показали положительный результат. В результате исследования работы новой системы были определены оптимальные параметры настроек регуляторов, при которых были получены требуемые РРР динамические и статические характеристики. Безотказное функционирование системы подтверждено длительными испытаниями при работе судна в штатном режиме в течение всей навигации.

Ключевые слова: судовая электростанция, дизель-генераторные установки, параллельная работа генераторов, судовые потребители, механические характеристики двигателей, статизм характеристик, механический регулятор оборотов дизеля, электронный регулятор скорости вращения.

Study of parallel operation of diesel generators of a ship power plant

Sergey V. Popov¹

Oleg A. Burmakin¹

Yuriy S. Malyshev¹

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Analysis of the power plants of a number of passenger ships showed the need to ensure the parallel operation of generators previously operating separately. The installed DGs are intended only for autonomous operation, which do not imply the introduction of statism

into the characteristics of the generators. The aim of the study is to scope and implement the working condition of the ship power plants in accordance with the current requirements of the Russian River Register (RRR), which imply stable parallel operation of the diesel generator. As a result of the operation of the installed diesel engines, the complexity of precise control of the mechanical characteristics was determined, associated with the specifics of the operation of the mechanical frequency controllers installed on the engines. To determine the quality of mechanical RFI, functional and structural diagrams of the system for stabilizing the frequency of rotation of a drive motor with a mechanical regulator were developed, on the basis of which the transfer function was obtained and a conclusion was made about the instability of the regulator at large values of backlash in the mechanical transmission. The achievement of this goal is possible by replacing the mechanical RFI with an electronic one with an actuator, which is confirmed by a mathematical analysis of the corresponding control systems. The transfer functions of control systems are obtained on the basis of the developed structural and functional models. Electronic controllers, made according to the presented schemes, have been introduced on a number of marine diesel generator sets and tested positive. As a result of the study of the new system operation, the optimal parameters of the regulator settings were determined, at which the required dynamic and static characteristics were obtained. The failure-free operation of the system has been confirmed by long-term tests with the vessel operating in normal mode throughout the navigation.

Keywords: ship power plant, diesel generator sets, parallel operation of generators, ship consumers, mechanical characteristics of engines, tilt characteristics, mechanical speed controller of diesel, electronic speed controller.

Введение

Суда речного флота эксплуатируются, как правило, в течении длительного времени. За это время технические требования к оборудованию судна изменяются, и одновременно устаревает уже установленное на судне техническое оборудование, в частности судовые электроэнергетические системы, что в конечном итоге требует их модернизации или замены.

В целях экономии средств при плановой замене дизель-генераторных (ДГ) установок для ряда судов была произведена закупка судовых агрегатов мощностью 100 кВт, предназначенных только для автономной работы. Система регулирования таких ДГ не предполагает введения статизма в характеристики генераторов. Однако, исходя из правил Российского Речного Регистра постройки судов внутреннего плавания (ПСВП) часть 4 п.3.6, источники электроэнергии должны обеспечивать как минимум кратковременную параллельную работу для перевода нагрузки с одного генератора на другой [1]. Отсюда следует, что обеспечение возможности параллельной работы дизель-генераторных агрегатов при переоборудовании судовой электростанции, является обязательным условием. В ряде случаев, переоборудование ДГ - агрегатов является экономически обоснованным, хотя и связано с большим числом документов и согласований.

Описание существующего объекта исследования и постановка задачи

На одном из судов 588-го проекта была выполнена замена четырех устаревших ДГ-агрегатов, составляющих основную электростанцию, на новые. Специфика главного распределительного щита (ГРЩ) электростанции содержит силовое коммутационное оборудование и схему распределения электроэнергии, которая позволяет выполнять раздельную работу на группы потребителей судна. В течение нескольких лет состав электрооборудования судна претерпел существенные изменения в сторону увеличения потребляемой мощности, поэтому энергии двух

раздельно работающих ДГ для обеспечения всех потребителей электроэнергией недостаточно. Эксперименты включения на параллельную работу ДГ судовой электростанции показали, что длительная параллельная работа генераторов в любой их комбинации невозможна.

Из теории известно, что для устойчивой параллельной работы дизель-генераторов и равномерного распределения нагрузки между ними их характеристики должны иметь статизм [2-5]. Дизельные двигатели новых агрегатов оснащены механическими регуляторами и имеют грубую регулировку для настройки номинальных оборотов двигателя. В ходе эксплуатации двигателей было выявлено, что при прогреве или при длительной их работе под нагрузкой настройка оборотов либо смещается в ту или иную сторону от номинала, либо наблюдается периодическое качание (изменение) оборотов около номинального значения. Периодическая настройка специалистами фирмы-поставщика ДГ насосов ТНВД (топливный насос высокого давления) и регуляторов не приводила к существенным улучшениям работы машин с точки зрения точности поддержания оборотов, а значит, и частоты напряжения генераторов.

Также на двигателе установлен механизм воздействия на топливную рейку (рис. 1), приводящийся в действие системой управления пуском и остановом ДГ. Этот механизм представляет собой электродвигатель с червячной передачей хода штока - перемещающегося элемента, который ограничивается двумя конечными выключателями.

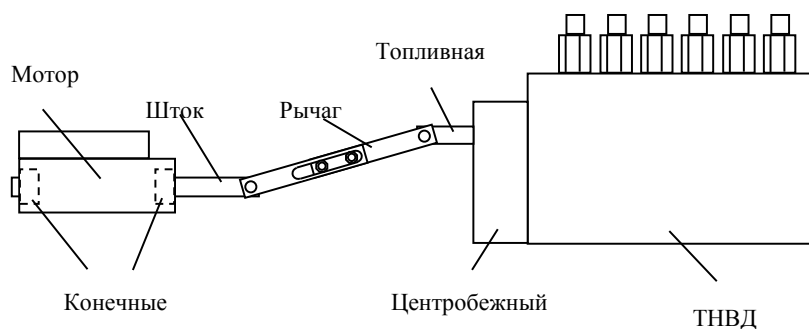


Рис. 1. Система с механическим регулятором частоты вращения двигателя

Оба выключателя являются датчиками положения штока, а значит, и топливной рейки, которые соответствуют полному перекрытию топлива и номинальной частоте вращения двигателя на холостом ходу. Положение топливной рейки при срабатывании второго микровыключателя может быть отрегулировано изменением длины дополнительной тяги. Регулирование положения штока возможно за счет подачи импульса напряжения на электродвигатель механизма вручную или автоматически.

Анализ механических характеристик (рис. 2), полученных экспериментально, показал, что характеристики имеют различный наклон, который может изменяться хаотичным образом (характеристики 1), что связано с наличием люфтов в механических передачах регулятора. Функциональная схема системы регулирования частоты вращения вала дизеля приведена на рисунке 3.

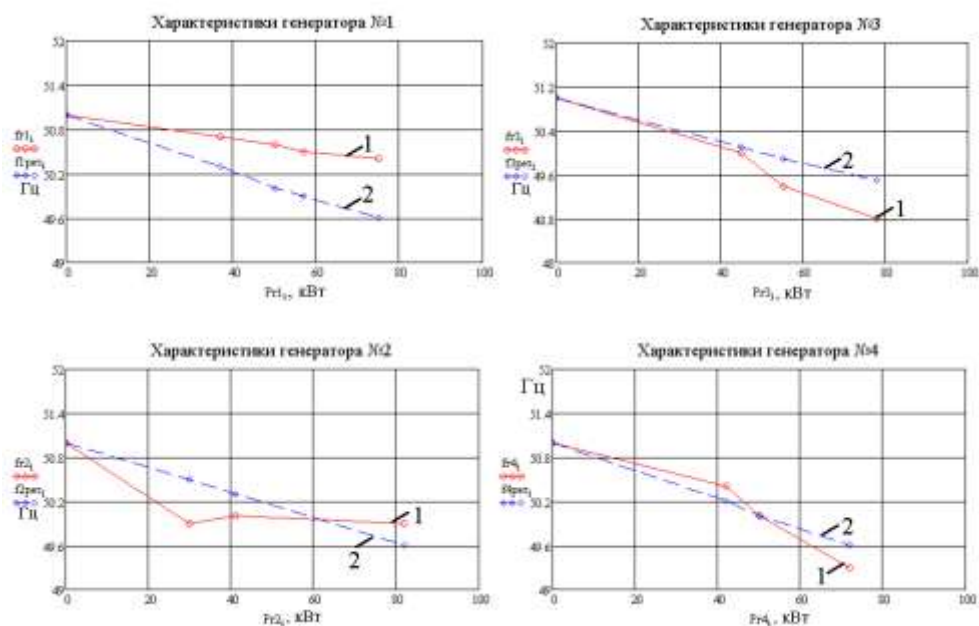


Рис. 2. Механические характеристики дизель-генераторов теплохода с механическими регуляторами частоты вращения - 1 и с электронными регуляторами - 2

Для реализации режима параллельной работы были выполнены попытки настройки механических характеристик двигателей при поочередном подключении одной и той же нагрузки. Исследование возможностей регулятора показало, что изменение положения топливной рейки выполняется с ограниченным быстродействием и достаточно низкой точностью. Периодические «перетоки» энергии от одного генератора к другому неизбежно приводят к отключению одного из генераторов средствами защиты.

Для определения качества РЧВ вала дизеля прямого действия составим функциональную схему системы (рис. 3) и ее динамическую модель.

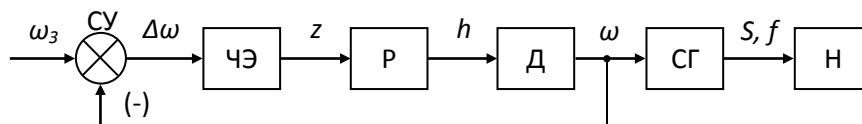


Рис. 3. Функциональная схема РЧВ вала дизеля:

СУ – суммирующее устройство; ЧЭ – чувствительный элемент; Р – регулятор; Д – дизель (объект управления); СГ – синхронный генератор; Н – нагрузка; ω_3 , ω – заданная и текущая величина угловой скорости вала дизеля, соответственно; $\Delta\omega$ – ошибка управления; z – положение муфты регулятора; h – положение рейки ТНВД; S – полная мощность; f – частота напряжения.

Механический регулятор частоты вращения двигателя может быть представлен структурой, содержащей несколько звеньев: центробежный чувствительный элемент (ЧЭ) с передаточной функцией

$$W_{\text{чз}}(p) = \frac{k_T}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

изодромное устройство – регулятор (P) с передаточной функцией

$$W_{\text{и}} = \frac{K_p (T_i p + 1)}{p(1 + T_p \cdot p)},$$

звено, определяющее зону нечувствительности - люфт

$$\varepsilon = \begin{cases} D_\varepsilon - D_n \text{ при } pD_\varepsilon > 0 \\ D_\varepsilon + D_n \text{ при } pD_\varepsilon < 0 \\ \text{const при } |D_\varepsilon - \varepsilon| < D_n \end{cases}$$

где D_n – значение зазора люфта, D_ε – разность между заданной ω , и действительной ω частотами вращения дизеля.

Графически характеристика типа «люфт» имеет вид, представленный на рисунке 4.

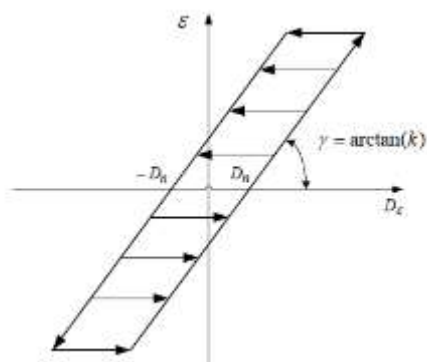


Рис. 4. Характеристика типа «люфт»

Дизельный двигатель (Д) может быть представлен в виде трех звеньев, описывающих тепловое преобразование энергии, инерцию и приложенную к валу нагрузку (рис. 5.) Преобразование тепловой энергии в движущий момент дизеля – M_D можно представить узлом сгорания топлива - УСТ, который выражается аperiodическим звеном с коэффициентом K_T и постоянной времени T_C :

$$W_D = \frac{K_T}{1 + T_C \cdot p}$$

Механическая часть дизеля с маховиком представлена интегрирующим звеном с коэффициентом K_D постоянной времени T_D :

$$W_M = \frac{K_D}{T_D \cdot p}$$

Как показывают экспериментальные исследования постоянной времени сгорания топлива T_C можно пренебречь, отнеся ее к малым постоянным времени.

На валу двигателя действуют три момента: момент, развиваемый дизелем - M_D ; момент сопротивления - M_{CD} , учитывающий трение, и момент нагрузки - M_G , возникающий на валу генератора - G при его загрузке активной мощностью. В структурной схеме дизеля (рис. 5) влияние нелинейного звена можно представить как действие момента сопротивления - M_{CD} величина которого составляет $8 \div 12$ % от номинального момента дизеля при номинальной частоте вращения. Это объясняется тем, что работа дизеля происходит при частоте близкой к номинальной во всем диапазоне нагрузок, т.е. в окрестностях ω_H нелинейного звена (кривая 1), поэтому оно может быть заменено звеном с постоянным коэффициентом передачи (пунктирная прямая 2):

$$K_{CD} = \frac{M_{CD}}{\omega_H}$$

где M_{CD} – собственный момент сопротивления.

Таким образом, структурная схема механической части дизеля может быть представлена интегрирующим звеном, охваченным отрицательной обратной связью с постоянным коэффициентом, т.е. апериодическим звеном со следующими параметрами:

$$W_{MD} = \frac{1/K_{CD}}{1 + \frac{T_D}{K_D \cdot K_{CD}} p} = \frac{K'_D}{1 + T'_D p}$$

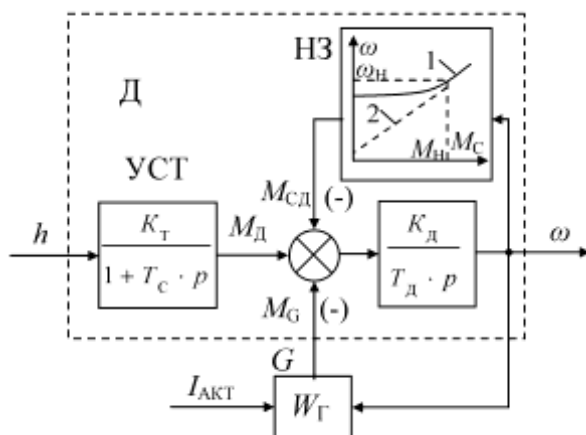


Рис. 5. Структурная схема дизеля

Качество автоматического регулирования угловой скорости вала дизеля определяется качеством переходных процессов в системе регулирования и зависит от правильности настроек регулятора. Для определения параметров регулятора рассмотрим структурную схему системы стабилизации частоты вращения (рис. 6), которая кроме элементов ЧЭ, Р и Д содержит звено нечувствительности - Л.

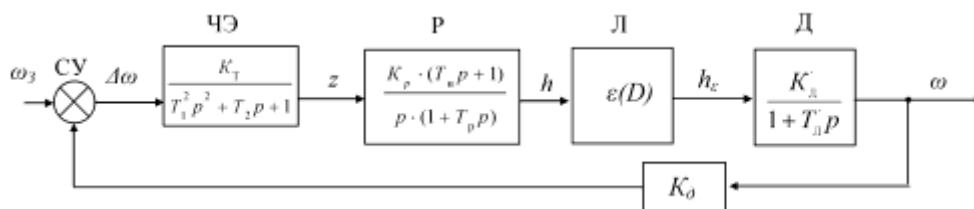


Рис. 6. Структурная схема системы стабилизации частоты вращения с механическим регулятором

Исходя из структурной схемы, можно определить статическую точность по возмущению, которая зависит от звена «Д»:

$$\Delta\omega_M = \frac{M_{G_{max}} \cdot W_M}{1 + W_{PA3}}$$

Поскольку передаточная функция разомкнутой системы W_{PA3} содержит функции дизеля и регулятора, то система регулирования не позволит обеспечить постоянный статизм характеристики двигателя, поэтому настройка системы при параллельной работе двух и более подобных дизель-генераторов усложняется из-за наличия люфтов с различными значениями зазоров, а настройка характеристик с целью получения их схожести практически не возможна.

Приближенная оценка перерегулирования σ может быть дана исходя из запаса по фазе на частоте среза – $\Delta\psi$:

$$\sigma_{max} = X_{уст} [1 - \sin\Delta\psi(\omega_c)] (100\%)$$

При превышении значения σ_{max} система становится неустойчивой. При параллельной работе ДГ с такими регуляторами система должна иметь большой запас по фазе, поскольку взаимное влияние люфтов регуляторов даже при малых значениях D_n выводит её из устойчивого состояния. Применение дополнительного регулятора для выполнения распределения нагрузок между параллельно работающими генераторами, воздействуя на мотор-регулятор, также не имеет смысла, поскольку в режиме постоянного регулирования механическая передача будет испытывать повышенный износ. Следовательно, регулирующий орган, как и регулятор, должны быть заменены на устройства, обладающие повышенной точностью и быстродействием.

Разработка и исследование электронной системы

В течение последних 15 лет для регулирования положения топливной рейки широко используют актуаторные системы с электронным регулятором скорости вращения двигателя [6-12]. Такие системы позволяют выполнять достаточно точное регулирование с высоким значением быстродействия и имеют высокую надежность [13]. Применяя электронные системы регулирования частоты вращения двигателей, возможно получить параллельную работу нескольких генераторных агрегатов при равномерном распределении нагрузки между ними [14]. Электронные системы

регулирования позволяют выполнять работу автономных газо-поршневых агрегатов параллельно с сетью и поддерживать загрузку генератора и сети на постоянном уровне [15].

Функциональная схема системы с электронным регулятором частоты вращения вала дизеля показана на рисунке 7. В системе установлен актуатор (А) – поворотный электромагнит, который через тягу воздействует на топливную рейку (ТР), регулируя подачу топлива в двигатель (Д). Обратная связь по скорости обеспечивается датчиком ДЧВ, измеряющим непосредственную скорость вала двигателя с высокой точностью. Напряжение задания U_3 поступает на вход регулятора, который управляет углом поворота выходного вала актуатора α за счет изменения тока электромагнита (что соответствует регулированию положения топливной рейки).

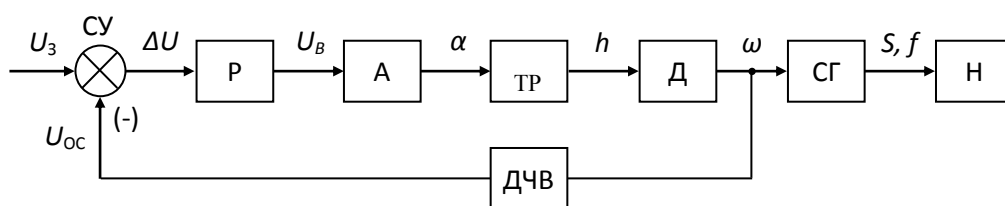


Рис. 7. Функциональная схема электронной системы регулирования частоты вращения дизеля

Для оценки динамических свойств системы регулирования составим структурную схему системы с электронным регулятором и актуатором. Поворотный электромагнит (актуатор) может быть представлен электромагнитной частью и механической частью с возвратной пружиной (см. рис. 8). Электромагнитная часть описывается аperiodическим звеном первого порядка с постоянной времени - $T_{aэ}$. Выходной ее координатой является ток или момент, развиваемый электромагнитом. Механическая часть описывается интегрирующим звеном с коэффициентом - K_a . Механическая часть охвачена отрицательной обратной связью, которую обеспечивает пружина. Ее жесткость оценивается величиной постоянного коэффициента - K_C . Так как выходной координатой актуатора является угол поворота его выходного вала, величина которого ограничена, на выходе актуатора установлен ограничитель - ОГР. После преобразования структурной схемы актуатора его передаточная функция может быть записана в виде:

$$W_A = \frac{K_{\Pi} \cdot K_M / R_a}{(1 + T_{\Sigma} p)} \cdot \frac{1 / K_C}{(1 + T_M p) \cdot (1 + T_{\text{пл}})} = \frac{K_A}{(1 + T_{\Sigma} p) \cdot (1 + T_M p) \cdot (1 + T_{\text{пл}})},$$

$$(T_M = \frac{1}{K_a \cdot K_C}) \quad (K_A = \frac{K_{\Pi} \cdot K_M}{R_a \cdot K_C})$$

где T_M – механическая постоянная времени актуатора

$$W_A = \frac{K_{aэ} / R}{1 + T_{\Sigma} \cdot p} \cdot \frac{K_M}{1 + T_M \cdot p}$$

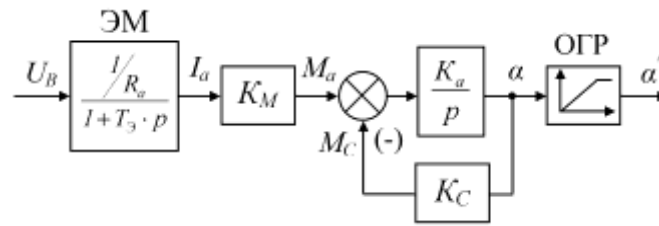


Рис. 8. Структурная схема актуатора

Как показывают экспериментальные исследования актуаторов, их механической постоянной времени – T_M можно пренебречь, отнеся ее к малым постоянным времени.

Оба звена охвачены единой отрицательной обратной связью, а возмущающее воздействие в виде момента сопротивления генератора – M_C приложено к входу интегрирующего звена.

Датчик частоты вращения – ДЧВ, представляющий собой преобразователь частоты вращения в частоту следования импульсов, может быть представлен звеном с чистым запаздыванием или аperiодическим звеном с малой постоянной времени $T_{OC} \approx \tau$.

На основании выполненных преобразований и упрощений структурной схемы системы регулирования частоты вращения (рис. 9) получим передаточную функцию объекта регулирования в виде:

$$W_{OP} = \frac{K_{\Sigma}}{(1 + T_B \cdot p) \cdot (1 + T_M \cdot p)(1 + T_{\mu} \cdot p)}$$

т. е. объект содержит две больших и одну малую некомпенсируемую постоянную времени. Для контура регулирования частоты вращения настроенного на модульный оптимум передаточная функция разомкнутой системы должна иметь вид:

$$W_{PA3} = \frac{1/K_{OC}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (1 + T_{\mu} \cdot p)}$$

Тогда передаточную функцию регулятора найдем как отношение:

$$W_{REG} = \frac{W_{PA3}}{W_{OP}} = \frac{(1 + T_{K1} \cdot p) \cdot (1 + T_{K2})}{T_{\mu} \cdot p}$$

Таким образом, регулятор должен скомпенсировать две большие постоянные времени T_B и T_M и придать контуру интегрирующие свойства для исключения статической ошибки по задающему воздействию. Для этой цели необходим ПИД-регулятор.

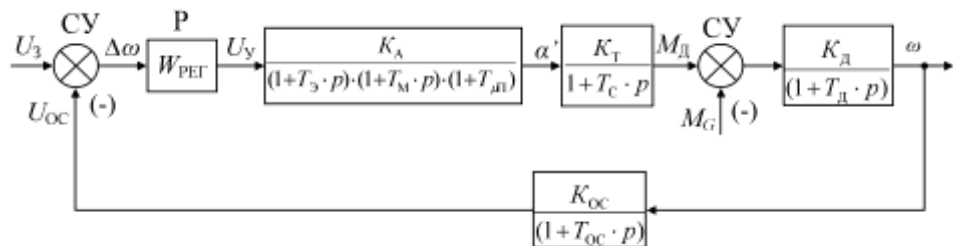


Рис. 9. Структурная схема электронной системы регулирования частоты вращения дизеля

Анализ W_{PA3} и W_f показывает, что в системе будет отсутствовать статическая ошибка по возмущающему воздействию, т. е.:

$$\Delta\omega_f = \frac{M_c \cdot W_f}{1 + W_{PA3}} = 0$$

Величины параметров K_S , T_B , T_M могут быть определены экспериментально по известным методикам, что позволяет установить требуемые параметры у регулятора частоты вращения.

Реализация и испытание разработанной системы

Для реализации быстродействующей системы на существующие двигатели были установлены актуаторы, тяги которых имеют возможность поворота на угол 60 гр. (рис. 10). При этом механические (центробежные) и моторные регуляторы были демонтированы. Электронные блоки цифрового регулятора частоты вращения (ЦРЧ) были установлены в шкаф управления двигателем. Для контроля скорости вращения двигателей около зубчатого колеса был установлен индукционный датчик, сигнал которого подается на ЦРЧ.

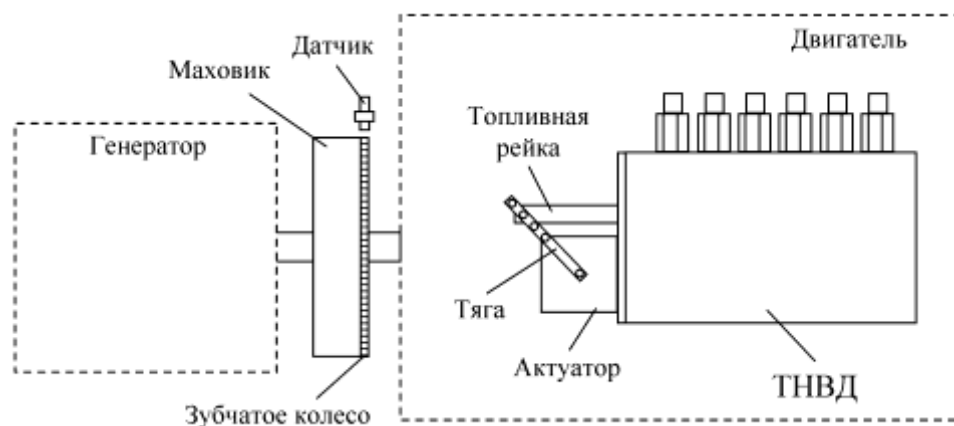


Рис. 10. ДГ с электронной системой регулирования частотой вращения двигателя

Функциональная схема системы регулирования с актуатором А показана на рисунке 11. Система регулирования интегрирована в систему управления работой и защитой двигателя с помощью релейной аппаратуры. По команде на запуск двигателя выполняется процесс стартерного пуска от аккумуляторной батареи, и при достижении минимальных оборотов, необходимых для «подхвата», система регулирования подает сигнал на отклонение актуатора, т.е. положения топливной рейки для запуска двигателя. Контролируя сигнал с датчика оборотов ДЧВ система за счет регулирования подачи топлива раскручивает двигатель до номинальной частоты вращения.

Принцип действия электронного блока основан на измерении текущего значения частоты вращения двигателя, сравнения его с заданным значением, формировании отклонения частот и регулировании тока поворотного электромагнита – актуатора в соответствии с величиной этого отклонения. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор позволяет выполнять регулирование с высокой

точностью в статических режимах работы ДГ и высоким быстродействием в динамических режимах работы ДГ при набросе и сбросе нагрузки.

Структурная схема системы регулирования показана на рисунке 12. После выполнения пуска двигателя частота холостого хода может быть отрегулирована потенциометром R_{CM} .

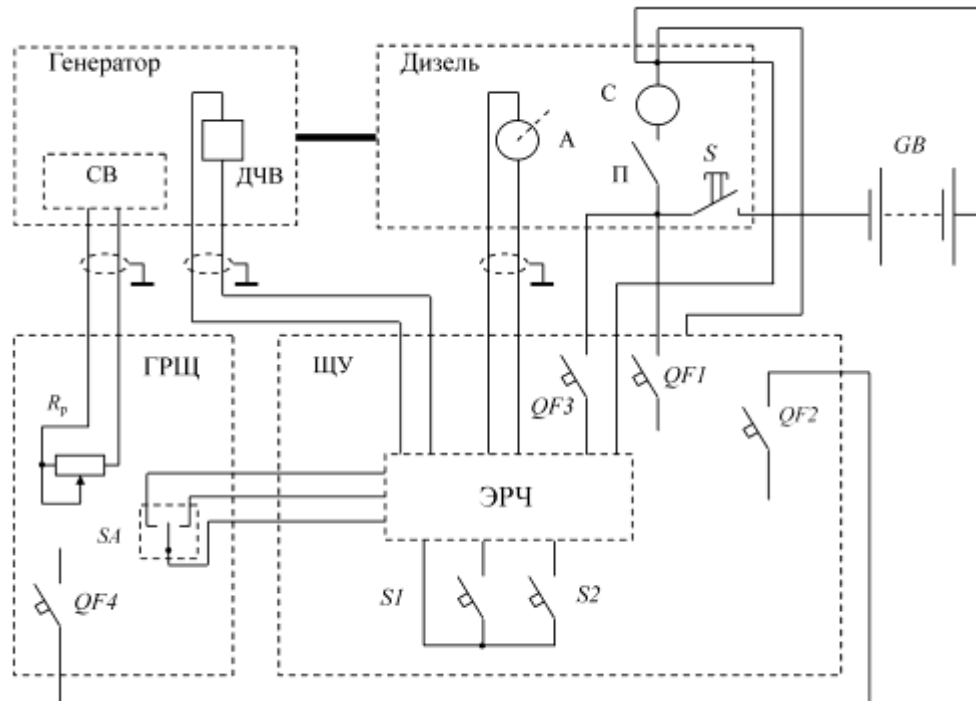


Рис. 11. Функциональная схема системы регулирования:
 GB – аккумуляторная батарея, С – стартер, П – пускатель, А – актуатор,
 ДЧВ – индукционный датчик частоты вращения, СВ – система
 возбуждения генератора, S – выключатель «массы», ЩУ – щит
 управления агрегатом, ЭРЧ – электронный регулятор частоты вращения
 дизеля, ГРЩ – главный распределительный щит, R_p – потенциометр
 регулировки напряжения генератора, SA – переключатель оборотов
 «больше/меньше» дизеля, QF1 – автоматический выключатель питания
 ЩУ (24В), QF2 – автоматический выключатель «Подогрев воды» (220В),
 S1 – выключатель «Прогрев», QF3 – автоматический выключатель
 питания ЦРЧ (24В), S2 – выключатель «Работа», QF4 – автоматический
 выключатель питания в ЩУ (220В).

При набросе (сбросе) нагрузки происходит резкое возрастание (снижение) момента сопротивления на валу двигателя, который имеет значительную постоянную времени, приводящую к затягиванию переходного процесса. Изменением значения потенциометра R_k регулируется коэффициент передачи пропорционального и дифференциального звеньев, что позволяет скомпенсировать отклоняющие воздействия и уменьшить время переходного процесса.

Поочередное исследование двигателей показало, что регулирование угла наклона механической характеристики двигателя достигается потенциометром R_{CT} и имеет значение 3-4 % при номинальной нагрузке от скорости холостого хода. Наклон характеристик остается постоянным и не изменяется при набросе и сбросе существенных нагрузок на ДГ. Постоянной остается и скорость холостого хода двигателей при их многократных остановках и запусках.

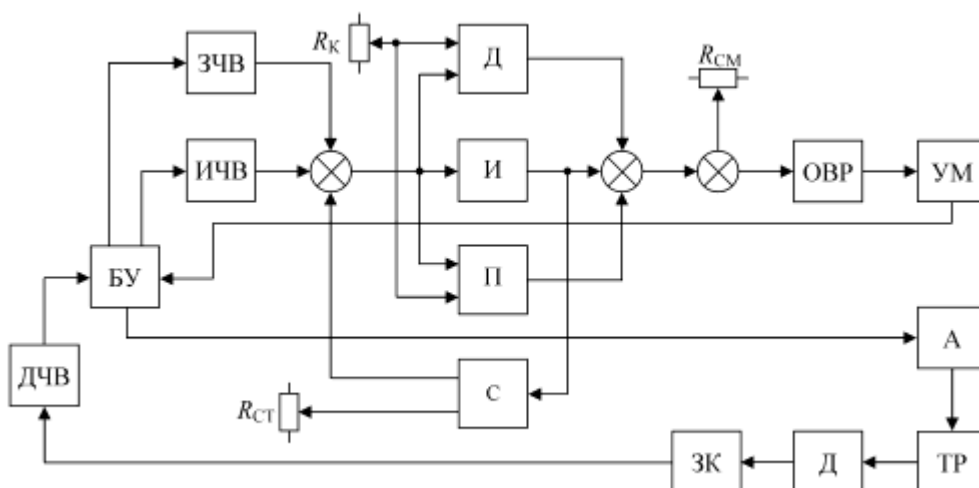


Рис. 12. Структурная схема системы регулирования:

ЗЧВ – задатчик частоты вращения, ДЧВ – датчик частоты вращения, ИЧВ – измеритель частоты вращения, Д-, И-, П-канал – дифференциальный, интегральный, пропорциональный каналы регулирования, С – блок задания статизма, ОВР – ограничитель вылета рейки, УМ – усилитель мощности, А – актуатор, ТР – топливная рейка, Д – двигатель, ЗК – зубчатое колесо, R_k , $R_{см}$, $R_{ст}$ – потенциометры задания коэффициента, смещения и статизма, соответственно.

Для равномерного распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, имеющими одинаковую мощность, желательно получить схожие механические характеристики с одинаковым наклоном. На рисунке 13 показаны механические характеристики двух дизель-генераторов, включенных на параллельную работу. Если характеристика 1 одного из двигателей является астатической, а характеристика 2 другого двигателя – статической, то параллельная работа возможна за счет регулятора второго двигателя (рис. 13, а). Тогда необходимо задавать значение загрузки генератора в зависимости от мощности нагрузки. В случае двух астатических характеристик двигателей, имеющих различный статизм [16], нагрузка будет распределяться не равномерно (рис. 13, б). Для получения одинаковой загрузки генераторов также необходима система распределения, которая будет воздействовать на положение топливных реек ТНВД двигателей.

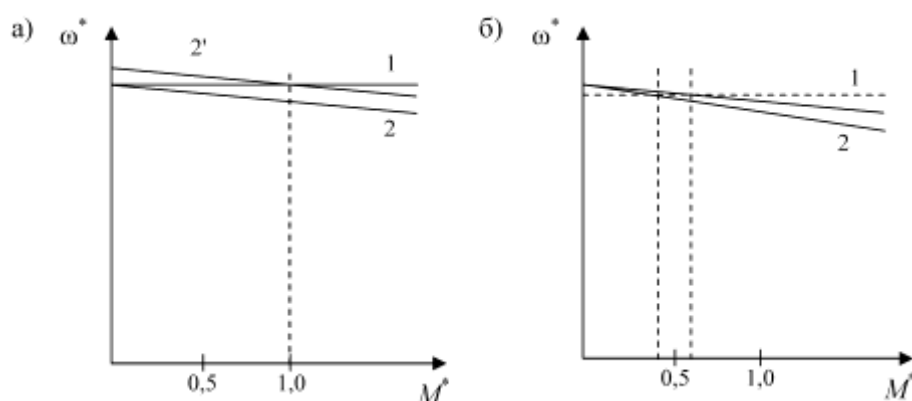


Рис. 13. Механические характеристики двигателей:

а) для 1-го – статическая, для 2-го – астатическая; б) для 1-го и 2-го – астатические.

Следует отметить, что электронные системы регулирования частоты вращения, установленные на двигатели, успешно выполняют запуск всех четырех машин, составляющих судовую электростанцию. Экспериментально было установлено, что при точной настройке регуляторов механические характеристики двигателей (см. рис. 2, характеристики 2) обладают одинаковым статизмом при загрузке генераторов до номинальной мощности. Исследование работы электростанции на судовые потребители подтвердило правильность технических решений, а оценка динамических характеристик показала лучшую устойчивость в работе ДГ, повышенное быстродействие и точность при набросе и сбросе нагрузки.

Важно учитывать, что канал регулирования активной мощности ДГ возможно настроить на устойчивую работу только в случае равномерного распределения реактивной мощности. Иначе, как показали эксперименты, параллельная работа ДГ является неустойчивой, что приводит к отключению генераторов.

Заключение

Длительная эксплуатация электронных систем регулирования частоты вращения двигателей показала их высокую надежность при минимальных эксплуатационных расходах. Электронные системы по сравнению с механическими регуляторами, которые необходимо периодически настраивать на специальном стенде, что влечет за собой их снятие, транспортировку и установку на штатное место насосов ТНВД, имеют минимальные эксплуатационные расходы. Как правило, обслуживание таких систем заключается в замене подшипников актуаторов и чистке поверхностей датчиков.

Экспериментальные исследования и опыт эксплуатации в течение всей навигации доказали актуальность модернизации систем регулирования скорости вращения вала вспомогательных двигателей.

Литература

1. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов Часть VI электрическое оборудование.
2. Алексеев Н. А. Особенности выбора способа управления резервными агрегатами судовой электростанции в зависимости от нагрузки на шинах главного распределительного щита / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 7–13.
3. Алексеев Н. А. Особенности синхронизации судовых генераторов в микропроцессорной системе DELOMATIC / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 193–196.
4. Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / Андрей Александрович Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
5. Григорьев А. В. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций / А. В. Григорьев, В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2014. – №6(28). – С. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43.
6. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Система автоматической загрузки генератора при работе параллельно с сетью: Труды НГТУ «Актуальные проблемы электроэнергетики». Юбилейный том, посвященный 100-летию со дня рождения В.И. Плескова. Том 70., НГТУ, Н.Новгород, 2008, с. 123-125.
7. Sørfon, I. Power Management Control of Electrical Propulsion Systems. In Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, Houston, TX, USA, 9–10 October 2012.

8. Radan, D. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
9. J M Prousalidis, E Xanthopoulos & K Voutzoulidis (2009) Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 8:1, 21-38, DOI: 10.1080/20464177.2009.11020216
10. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
11. IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies; IEEE Power Engineering Society: Piscataway, NJ, USA, 2005.
12. Radan, D.; Johansen, T.A.; Sorensen, A.J.; Adnanes, A.K. Optimization of load dependent start tables in marine power management systems with blackout prevention. *Trans. Circuits Syst.* 2005, 4, 1861–1866.
13. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Исследование элементов судовой электростанции на базе макета дизель-генераторной установки: Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2009». Труды конгресса. Том 2. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун. – Н.Новгород: НГАСУ, 2010. – с. 552-555.
14. Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В. Алгоритм управления автономной электростанцией при параллельной работе с сетью ограниченной мощности. 13 Международный научно-промышленный форум «Великие реки – 2011». Труды конгресса. Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – с. 262-266.
15. Попов С.В., Бурда Е.М. «Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети». Материалы НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики», НГТУ, Н.Новгород, 2015, - с. 8-11.
16. Brown N, "Synchronous Generator Case Study", IEE Residential course on Electrical Generators, 1999/2001.

References

1. Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila klassifikacii i postrojki sudov CHast' VI elektricheskoe oborudovanie.
2. Alekseev N. A. Osobennosti vybora sposoba upravleniya rezervnymi agregatami sudovoj elektrostancii v zavisimosti ot nagruzki na shinah glavnogo raspredelitel'nogo shchita / N. A. Alekseev, A. A. Vinogradov // Sbornik nauchnyh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. — S. 7–13.
3. Alekseev N. A. Osobennosti sinhronizacii sudovyh generatorov v mikroprocessornoj sisteme DELOMATIC / N. A. Alekseev, A. N. Duksin // Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheckoj konferencii PPS, nauchnyh sotrudnikov i kursantov. — SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2008. — S. 193–196.
4. Vinogradov A. A. Issledovanie raspredeleniya nagruzki sudovyh dizel'-generatornyh agregatov pri ih parallel'noj rabote / Andrej Aleksandrovich Vinogradov // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. - 2017. - №2(42). - С. 373-379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379
5. Grigor'ev A. V. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii sudovyh dizel'nyh elektrostancij / A. V. Grigor'ev, V. YU. Kolesnichenko // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. - 2014. – №6(28). – С. 39-43. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-6-39-43.
6. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Sistema avtomaticheskoy zagruzki generatora pri rabote parallel'no s set'yu: Trudy NGTU «Aktual'nye problemy elektroenergetiki». YUbilejnyj tom, posvyashchennyj 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.I. Pleskova. Tom 70., NGTU, N.Novgorod, 2008, s. 123-125.
7. Sørfon, I. Power Management Control of Electrical Propulsion Systems. In Proceedings of the Dynamic Positioning Conference, Houston, TX, USA, 9–10 October 2012.
8. Radan, D. Integrated Control of Marine Electrical Power Systems. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.

9. J M Prousalidis, E Xanthopoulos & K Voutzoulidis (2009) Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 8:1, 21-38, DOI: 10.1080/20464177.2009.11020216
10. Fuchs E. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines* / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.
11. IEEE Power Engineering Society. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*; IEEE Power Engineering Society: Piscataway, NJ, USA, 2005.
12. Radan, D.; Johansen, T.A.; Sorensen, A.J.; Adnanes, A.K. Optimization of load dependent start tables in marine power management systems with blackout prevention. *Trans. Circuits Syst.* 2005, 4, 1861–1866.
13. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Issledovanie elementov sudovoj elektrostancii na baze maketa dizel'-generatornoj ustanovki: Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki – 2009». *Trudy kongressa. Tom 2. N.Novgorod: Nizhegorod. gos. arhit.-stroit. un. – N.Novgorod: NGASU, 2010. – s. 552-555.*
14. Korobko G.I., Popov S.V., Bishletov A.V. Algoritm upravleniya avtonomnoj elektrostanciej pri parallel'noj rabote s set'yu ogranichennoj moshchnosti. 13 Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki – 2011». *Trudy kongressa. N.Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2012. – s. 262-266.*
15. Popov S.V., Burda E.M. «Obespechenie nagruzki elektricheskoy moshchnost'yu v usloviyah ogranichennoj moshchnosti seti». *Materialy NTK «Aktual'nye problemy elektroenergetiki», NGTU, N.Novgorod, 2015, - s. 8-11.*
16. Brown N, "Synchronous Generator Case Study", IEE Residential course on Electrical Generators, 1999/2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Попов Сергей Васильевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Popovsev3@ya.ru

Sergey V. Popov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951,

Бурмакин Олег Анатольевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: boa_71@mail.ru

Oleg A. Burmakin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Мальшев Юрий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: elektrikasp@mail.ru

Yuriy S. Malyshev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Received 01.02.2021; published online 23.03.2021.