

Поступила в редакцию 12.10.2020

DOI 10.46960/2658-6754\_2020\_4\_42

УДК 621.316.722.9

**В.Г. Сугаков, А.А. Тошев, Н.С. Варламов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВНЕШНЕЙ ФОРСИРОВКОЙ**

Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижегород, Россия*

Приведены результаты исследования, целью которого было моделирование и анализ процессов в системе с использованием различных способов формирования напряжения внешней форсировки, рассмотрены различные системы внешней форсировки в составе имитационной модели судовой электроэнергетической системы. Представлены результаты моделирования при изменении коэффициента форсировки и мощности подключаемой нагрузки. На основе результатов моделирования определены значения переходного отклонения напряжения и длительности режимов форсировки. Выявлено, что контроль приращения напряжения позволяет улучшить качество и сократить длительность переходного процесса. Практическое значение работы определяется задачами обеспечения номинального режима работы потребителей и элементов электроэнергетической системы в целом, в частности – на объектах водного транспорта.

**Ключевые слова:** внешняя форсировка, имитационная модель, переходный процесс, синхронный генератор, системы возбуждения.

### **I. Введение**

Обеспечение качества электрической энергии на объектах водного транспорта согласно требованиям [1-4] является актуальной задачей [5-7]. Качество электрической энергии в судовых электроэнергетических системах во многом зависит от системы регулирования возбуждения генератора, а значит, повышение качества регулирования возбуждения является не менее актуальной задачей [8, 9]. Применение системы автоматического регулирования возбуждения (САРВ) с использованием внешней форсировки (ВФ) – один из вариантов улучшения качества регулирования возбуждения судовых синхронных генераторов является. Он особенно актуален в случаях, когда мощность нагрузки соизмерима с мощностью источника электрической энергии [10, 11].

Исследования имитационных моделей судовых электроэнергетиче-

ских систем показали высокую эффективность применения систем с ВФ [10–12], обеспечивающих высокую форсировочную способность и высокое быстродействие. Однако в данных исследованиях не были отражены особенности работы систем с различными способами формирования напряжения форсировки. Целью настоящей работы является анализ переходных процессов, протекающих в электроэнергетической системе, при использовании разработанных систем ВФ и ВФ с контролем приращения напряжения (КПН).

## II. Методы и материалы

Одним из основных показателей качества электрической энергии, характеризующих переходный процесс, является переходное отклонение напряжения. Согласно [1, 2], переходное отклонение напряжения является величиной, равной разности между действительным и установившимся значениями напряжения, и выражается в процентах от номинального значения напряжения (рис. 1).

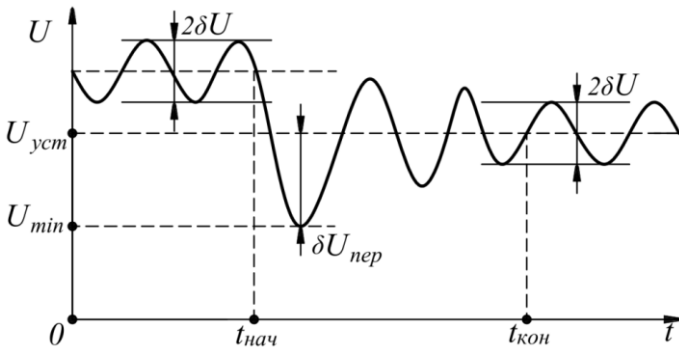


Рис. 1. Оциллограмма напряжений при набросе нагрузки

Переходное отклонение напряжения  $\delta U_{пер}$  при набросе нагрузки определяется по формуле:

$$\delta U_{пер} = \frac{U_{min} - U_{уст}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{min}$ ,  $U_{уст}$ ,  $U_{ном}$  — соответственно минимальное, установившееся и номинальное значение напряжения, В.

Для анализа переходного процесса в трехфазной системе электропитания построена имитационная модель (рис. 2). Модель включает: синхронный генератор ( $GI$ ) с блоками системы автоматического регулирования напряжения ( $ExcitationSystem1$ ) и внешней форсировки ( $VFI$ ),

трехфазный измеритель напряжения (*Measurement1*), блоки вычисления прямой последовательности напряжения (*Analyzer1* и *Analyzer2*), блок включения нагрузки (*Breaker1*) и нагрузок (*Load1* и *Load2*). Блок *VF1* представлен в виде подсистемы, структура которой определяется в зависимости от исследуемой схемы ВФ. Имитационные модели системы САРВ с ВФ и с ВФ и КПН и их описания более подробно приведены в работах [12, 13].

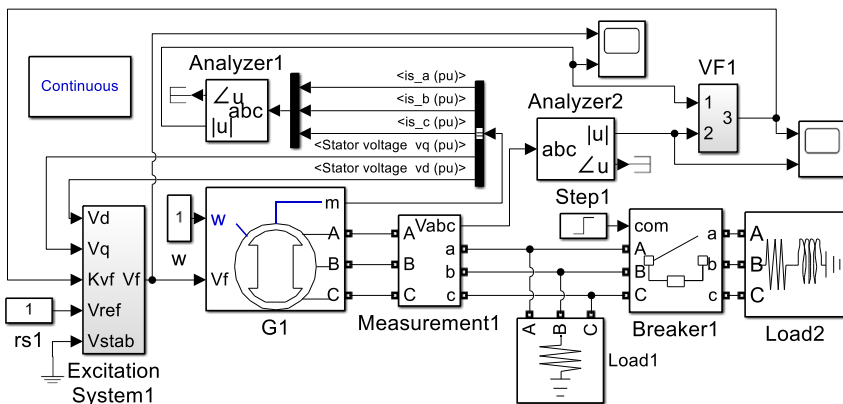


Рис. 2. Схема имитационной модели судовой системы электроснабжения

Исследование проводилось следующим образом. В имитационной модели устанавливаются заданные значения напряжения (блок *rs1*) и частоты (блок *w*). Затем ступенчато изменяют мощность нагрузки (*Step1* и *Breaker1*) и измеряют напряжение на выходе генератора.

Использовался следующий ряд значений, который задавался в блоке *VF1* коэффициента форсировки для различных систем ВФ: 0, 1, 3, 5, 7.

### III. Результаты исследования

Для изучения зависимости переходного отклонения напряжения от коэффициента форсировки в САРВ с различными типами ВФ проведено исследование имитационной модели при изменении мощности подключаемой нагрузки и коэффициента форсировки.

Переходные процессы, полученные в результате исследования имитационной модели, изображены на рис. 3 и 4. Коэффициент форсировки в данном случае принимался равным 7.

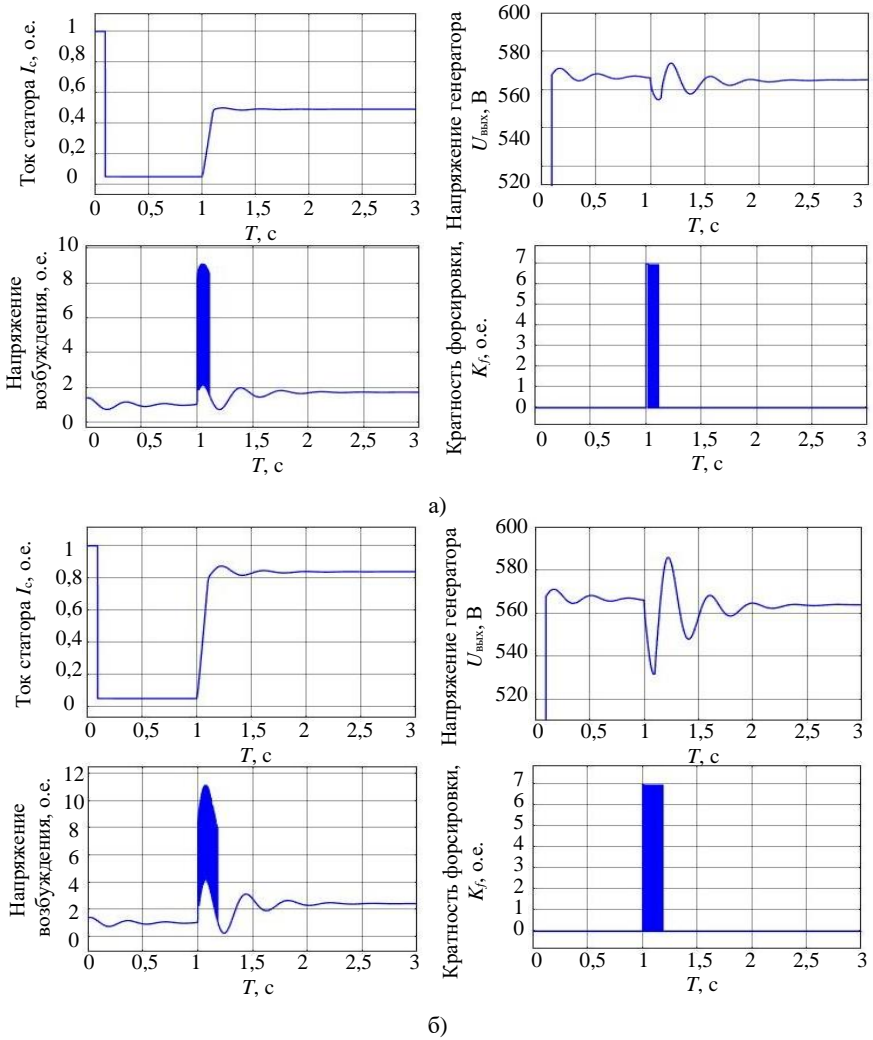


Рис. 3. Результаты математического моделирования САРВ с ВФ (при набросе нагрузки в 50 % (а) и 100 % (б) от мощности генератора)

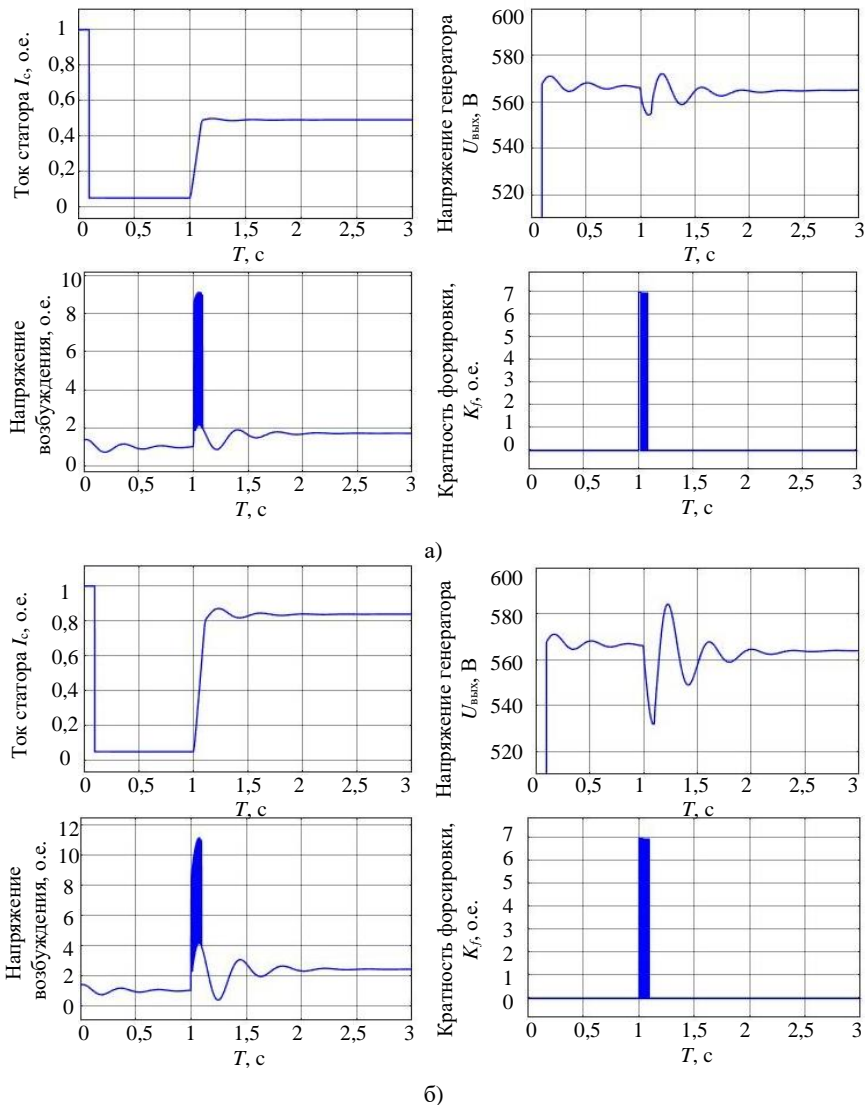


Рис. 4. Результаты математического моделирования САРВ с ВФ и КПН (при набросе нагрузки 50 % (а) и 100 % (б) от мощности генератора)

По результатам моделирования установлено, что в случае исследования САРВ с ВФ (рис. 3) значение  $\delta U_{\text{пер}}$  составляет 3 % от номинального

напряжения при набросе нагрузки, мощность которой равна 50 % от мощности генератора. При мощности нагрузки, равной мощности генератора, значение  $\delta U_{\text{пер}}$  увеличивается до 4,77 %. Также с увеличением мощности подключаемой нагрузки увеличивается время форсировочного режима, длительность которого увеличивается на 0,1 с.

Во втором случае, когда исследуется САРВ с ВФ и КПН (рис. 4), значение  $\delta U_{\text{пер}}$  составляет 2,83 % и 4,24 % от номинального напряжения при величине мощности подключаемой нагрузки равной 50 % и 100 % от мощности синхронного генератора соответственно. Длительность форсировочного режима сокращается практически в два раза по сравнению с САРВ без использования КПН, что позволяет снизить энергопотребление системы.

Результаты исследования зависимости переходного отклонения напряжения от коэффициента форсировки на различных ступенях нагрузки для системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой приведены в табл. 1.

Таблица 1.  
Значение  $\delta U_{\text{пер}}$  при различных системах ВФ

Коэффициент форсировки $V_f$	Ступени нагрузки, в % от номинальной мощности источника электрической энергии							
	50 %		65 %		80 %		100 %	
	Переходное отклонение напряжения $\delta U_{\text{пер}}$							
	В	%	В	%	В	%	В	%
<b>САРВ с ВФ</b>								
0	30	5,30	39	6,89	48	8,48	58	10,25
1	28	4,95	36	6,36	43	7,60	49	8,66
3	23	4,06	27	4,77	34	6,01	38	6,71
5	19	3,36	23	4,06	29	5,12	34	6,01
7	17	3,00	18	3,18	22	3,89	27	4,77
<b>САРВ с ВФ и КПН</b>								
0	30	5,30	39	6,89	48	8,48	58	10,24
1	25	4,47	33	5,83	40	7,07	44	7,77
3	20	3,53	24	4,24	30	5,30	33	5,83
5	17	3,00	19	3,35	24	4,24	29	5,12
7	16	2,83	16	2,82	20	3,53	24	4,24

Из табл. 1 видно, что использование КПН в системах ВФ приводит к уменьшению значения  $\delta U_{\text{пер}}$  при увеличении мощности подключаемой нагрузки или при изменении значения коэффициента форсировки  $V_f$ . При этом наибольшая эффективность наблюдается при значении  $V_f = 5$  при

мощности нагрузки от 65 % до 100 % от мощности генератора. При уменьшении мощности подключаемой нагрузки ниже или равном 50 %, наибольшая эффективность наблюдается при коэффициенте  $V_f = 3$ .

Сопоставление данного исследования с работой [14] показало, что при подключении потребителя соизмеримого по мощности с источником электрической энергии и отсутствии ВФ (при использовании внутренних возможностей системы возбуждения) значение  $\delta U_{\text{пер}}$  составляет 10,25 % (58 В). При использовании ВФ и при коэффициенте внешней форсировки равном 3, данный показатель составил 6,71 % (38 В), а при коэффициенте равном 7 – 4,77 % (27 В). Использование ВФ с КПН при коэффициенте форсировки равном 3 значение  $\delta U_{\text{пер}}$  составило 5,83 % (33 В), а при коэффициенте 7 – 4,24 % или 24 В.

#### IV. Заключение

На основе представленных результатов исследования имитационной модели установлено, что контроль приращения напряжения в системах ВФ обеспечивает снижение значения переходного отклонения напряжения и улучшает качество переходного процесса при набросе нагрузки, мощность которой соизмерима с мощностью генераторного агрегата. Помимо этого, КПН позволяет сократить длительность форсировочного режима и улучшить энергетические характеристики системы в целом.

© Сугаков В.Г., 2020

© Тоцев А.А., 2020

© Варламов Н.С., 2020

#### Библиографический список

- [1] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [2] ГОСТ Р 54130-2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. Введ. 2012-07-01. М.: Стандартинформ, 2012. – 95 с.
- [3] Российский Речной Регистр. Правила (в 5 т.). Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). М.: Российский речной регистр, 2017. – 1885 с.
- [4] Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть XI. Электрическое оборудование. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 131 с.
- [5] Семенов Б.Ю. Силовая электроника. Профессиональные решения. Саратов: Профообразование, 2017. – 415 с.

- 
- [6] Ананичева С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах. 3-е изд. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с.
- [7] Карташев, И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- [8] Лейзгольд Д.Ю., Ромодин А.В., Трушников К.П. Показатели качества электрической энергии как индикаторы эффективности управления электропотреблением // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11-7. С. 1501-1506.
- [9] Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. М.: Высшая школа, 2002. – 511 с.
- [10] Тощев А.А., Сугаков В.Г. Система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой // *Речной транспорт (XXI век)*. 2014. № 1 (66). С. 70-71.
- [11] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Тощев А.А. Система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой, Пат. 2510698 RU, заявл. 28.11.2012; опубл. 10.04.2014. – Бюл. № 10.
- [12] Сугаков В.Г., Тощев А.А. Моделирование системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой // *Труды конгресса «Великие реки-2018»*, Май 15-18, 2018, Волжский, Россия. 2018. Вып. 7. С. 1-5.
- [13] Тощев А.А., Сугаков В.Г., Зобов Л.В. Математическое моделирование системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой // *Труды Крыловского Государственного Научного Центра*. 2019. № S2. С. 205-211. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-205-211.
- [14] Сугаков В.Г., Тощев А.А., Зобов Л.В. Математическая и имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения с внешней форсировкой // *Вестник Волжской Государственной Академии Водного Транспорта*. 2019. № 58. С. 174-180.



V.G. Sugakov, A.A. Toshev, N.S. Varlamov

## **TRANSITION PROCESSES RESEARCH IN SHIP SYNCHRONOUS GENERATORS' EXCITATION REGULATION SYSTEMS WITH EXTERNAL FORCING**

Volga State University of Water Transport  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** Consumers' nominal operating mode and electric power system elements achievement as a whole is closely related to the electric power quality. Especially it is applicable to the water transport facilities, where the comparable power load connection results in the voltage dips and other negative effects as well. The voltage dips magnitude directly depends on the synchronous generator's excitation control system reaction to external influences.

It's worth mentioning that various excitation systems' technical solutions have certain drawbacks despite various their large number, for example low forcing ability and, as a consequence, the inability to directly start asynchronous motors with a squirrel-cage rotor, comparable in power to an electric energy source. The external forcing use in the current systems provides a high forcing capacity, which results in reducing the voltage dips magnitude when switching powerful electric energy consumers. This paper discusses various external forcing systems as part of the simulation model of the ship's electric power system. The research goal is to simulate and analyze the processes in the system using various methods of generating external forcing voltage.

The simulation results when changing the force coefficient and the connected load power are demonstrated. The transient voltage deviation values and the forcing modes duration are determined based on the results. It was revealed that the voltage increment control may improve the transient process quality and reduce its duration.

**Keywords:** excitation systems, external forcing, simulation model, synchronous generator, transient.

### **References**

- [1] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [2] The electrical energy quality. Terms and Definitions, GOST R 54130-2010, July 2012.
- [3] Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila [Russian River Register. Rules]. Vol. 2. Pravila klassifikacii i postrojki sudov (PKPS) [Rules for the classification and construction of ships (RCCS)]. Moscow: Russian River Register, 2017 (in Russian).
- [4] Pravila klassifikaciii postrojki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva [Rules for the classification and construction of sea-going ships of the Russian Maritime Register of Shipping]. Part XI. Elektricheskoe oborudovanie

- [Electrical equipment]. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2018 (in Russian).
- [5] B.Yu. Semenov, *Silovaya elektronika. Professional'nye resheniya [Power electronics. Professional solutions]*. Saratov: Profoobrazovanie, 2017 (in Russian).
- [6] S.S. Ananicheva, A.A. Alekssev and A.L. Myzin, *Kachestvo elektroenergii. Regulirovanie napryazheniya i chastoty v energosistemah [Power quality. Regulation of voltage and frequency in power systems]*. 3rd ed. Ekaterinburg: UrFU, 2012 (in Russian).
- [7] I. I. Kartashev, V.N. Tulsy, R.G. Shamonov, Yu.V. Sharov and R.R. Nasyrov. *Upravlenie kachestvom elektroenergii [Power quality management]*. Moscow: MPEI publishing house, 2006 (in Russian).
- [8] D.Y. Leyzgold, A.V. Romodin and K.P. Trushnikov, “Power quality indicators as effectiveness indicators of power management”, *Fundamental research*, no. 11-7, pp 1501–1506, 2014.
- [9] E.M. Lopukhina and G.A. Semenchukov, *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin maloj moshchnosti [Computer aided design of low power electrical machines]*. Moscow: High school, 2002 (in Russian).
- [10] A.A. Toshev and V.G. Sugakov, “Sistema возбуждениya синхронного генератора s vneshnej forsirovkoj [Excitation system of a synchronous generator with external forcing]”, *Rechnoj transport (XXI vek) [River transport (XXI century)]*, no. 1 (66), pp. 70-71, 2014 (in Russian).
- [11] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov, Yu.S. Malyshev and A.A. Toshev, “Sistema возбуждениya синхронного генератора s vneshnej forsirovkoj [Excitation system of a synchronous generator with external forcing]”, Patent RU 2510698, Apr. 10, 2014 (in Russian).
- [12] V.G. Sugakov and A.A. Toshev, “Simulation system of automatic control of excitation of synchronous generator with external forcing”, in *proc. 19th congress «Velikie reki-2018» [Great rivers-2018]*, May 15-18, 2018, Volzhsky, Russia, is. 7, pp. 1-5 (in Russian).
- [13] A.A. Toshev, V.G. Sugakov and L.V. Zobov, “Mathematical simulation of automatic excitation tuning system for marine alternator with external boosting”, *Transactions of the Krylov State Research Centre*, no. S2, pp. 205-211, 2019. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-205-211.
- [14] V.G. Sugakov, A.A. Toshev and L.V. Zobov, “Mathematical and imitation model of the system of automatic regulation of excitation of a shipboard synchronous generator with external forcing”, *Bulletin of VSAWT*, no. 58, pp. 174-180, 2019.