

Л. И. МАЗУРЕНКО, д-р техн. наук, зав. отделом ИЭД НАН Украины;
А. В. ДЖУРА, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИЭД НАН Украины;
В. И. РОМАНЕНКО, канд. техн. наук, науч. сотр. ИЭД НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С АСИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Проведены численные исследования электромеханических процессов в автономной энергосистеме постоянного тока с бесконтактными асинхронными генераторами. Расчеты выполнены на основе ранее предложенной авторами модели, которая включает взаимосвязанные математические модели дизелей, генераторов, их систем возбуждения, систем управления возбуждением генераторов и контроллера распределения мощности в системе. Также предложен и учтен при моделировании алгоритм работы электронного регулятора частоты вращения дизелей. Результаты численных экспериментов подтверждена эффективность предложенных подходов к регулированию электромеханических процессов в системе.

Ключевые слова: асинхронный генератор, дизель, автономная энергосистема.

Введение

Асинхронные генераторы с вентильным возбуждением (АГ с ВВ) по цепям статора известны, начиная с 80-х годов 20-го столетия. За прошедшее время был проведен большой объем исследований направленных на создание математических моделей, алгоритмов управления и рекомендаций по проектированию этого типа генераторов [1]. Среди недостаточно освещенных в литературе вопросов остается вопрос параллельной работы АГ с ВВ в автономных энергосистемах (АЭ) [2] и моделирование работы АГ с ВВ с учетом динамики привода.

Целью работы является проведение численных исследований работы дизельной АЭ на основе АГ с ВВ, которые работают параллельно по цепи постоянного тока (рис. 1), с учетом систем управления дизелей и АГ для тестирования ранее предложенного математического описания и алгоритмов управления такой АЭ.

Анализ основных достижений и технической литературы. Математическая модель силовой части (электрическая часть и привод АГ)

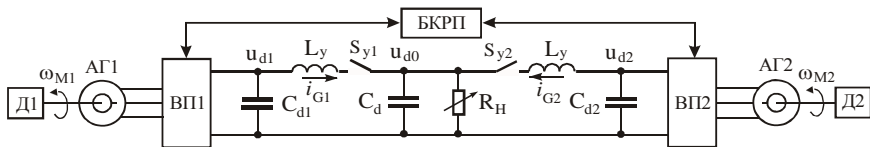


Рис. 1 – Схема силовой части АЭ

исследуемой АЭ и алгоритм управления ключами вентильных преобразователей (ВП) при однократном переключении за период приведены в [3], а алгоритм работы БКРМ (блок контроля распределения мощности) рассмотрен в [4].

Упрощенная разомкнутая модель дизельного агрегата (рис. 2) учитывает задержки отработки момента, связанные с инерционностью актуатора (τ_A) и поршневой системы (Θ) [3].

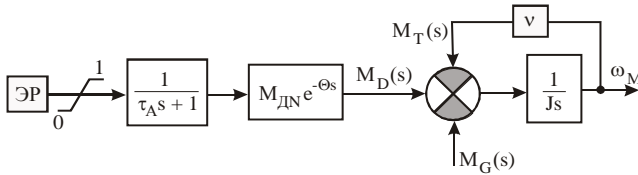


Рис. 2 – Упрощенная модель дизеля с разомкнутой обратной связью по частоте вращения

В то же время численных исследований АЭ постоянного тока на основе АГ с ВВ не проводилось, что не позволяет оценить эффективность алгоритмов управления ее элементами и ее работоспособность в целом.

Постановка задачи и материалы исследований. Проведем расчетные исследования АЭ. Примем, что АГ1 (рис. 1) выполнен на основе машины АМ4А250S4У3 (мощность 75 кВт), а АГ2 – на основе АМ4А280S4У3 (мощность 110 кВт). Номинальные моменты и моменты инерции этих машин соответственно равны $M_{Г1} = 484,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{Г2} = 718,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $J_{Г1} = 1,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_{Г2} = 2,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Результирующие моменты инерции агрегатов (дизель и генератор) примем четырехкратным по отношению к моментам инерции генераторов: $J_1 = 4,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 9,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. П этом постоянные времени дизелей зададим $\tau_A = 0,0035 \text{ с}$, $\Theta = 0,04 \text{ с}$.

Регулирование частоты вращения дизелей осуществляют, как известно, двумя способами [5]:

1. По отклонению частоты.
2. По отклонению активной нагрузки и частоты.

В обоих случаях эти отклонения преобразуются в перемещение рейки топливного насоса.

В исследуемой АЭ используем электронные регуляторы частоты которые функционирует по отклонению частоты.

Максимальный индикаторный момент дизелей зададим таким, чтобы при номинальной частоте вращения максимальный полезный момент на валу равнялся 110 % от номинального момента машин. Суммарные потери на трение в АГ и дизелях примем пропорционально зависимыми от оборотов.

Тогда, если механический КПД обоих дизелей $\eta_D = 0,85$, то максимальные индикаторные моменты дизелей должны быть:

$$M_{D1max} = M_{Г1} \cdot \frac{1,1}{\eta_D} = 627 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad M_{D2max} = M_{Г2} \cdot \frac{1,1}{\eta_D} = 930 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При этом коэффициенты трения

$$v_1 = \frac{(1 - \eta_D) \cdot M_{D1max}}{\omega_{M1N}} = \frac{0,15 \cdot 627}{157} = 0,599,$$

$$v_2 = \frac{(1 - \eta_D) \cdot M_{D2max}}{\omega_{M2N}} = \frac{0,15 \cdot 930}{157} = 0,888.$$

Характеристики холостого хода (х.х.) машин для учета насыщения получим путем расчета по известной методике [6].

Таблица 1 – Характеристика х.х. АГ1, $f = 50$ Гц

U_0 , В	170	180	190	200	210	215	220	225
I_0 , А	21,94	24,54	26,46	28,55	30,96	32,33	33,50	35,48
U_0 , В	230	235	240	250	260	270	275	
I_0 , А	37,36	39,58	42,41	49,39	59,61	73,52	81,20	

Таблица 2 – Характеристика х.х. АГ2, $f = 50$ Гц

U_0 , В	170	180	190	200	210	215	220	224
I_0 , А	26,71	28,69	30,81	33,10	35,58	37,14	38,50	40,02
U_0 , В	228	232	240	250	260	270	280	290
I_0 , А	41,69	43,38	47,44	54,34	63,07	73,79	89,12	108,11

Графики загрузки АГ1 $i_{G1}^*(P_{opr})$ и АГ2 $i_{G2}^*(P_{opr})$ [4] зададим графически (рис. 3).

На приведенных графиках i_{G1}^* , i_{G2}^* – заданные выходные токи генераторов по цепи постоянного тока, приведенные к сумме мгновенных токов $i_{G1} + i_{G2}$, а P_{opr} – прогнозируемая, приведенная к номинальной мощности нагрузки $P_{НВ}$ (принимая 125 кВт), мощность, которая потребляется сетью от генераторов в установившемся режиме. Из рис. 3 видно, что при нагрузке до 40 % от $P_{НВ}$ должен работать только АГ1, от 40 % до 60 % – АГ2, от 60 % и больше – оба АГ, распределяя мощность в отношении 1:1,5.

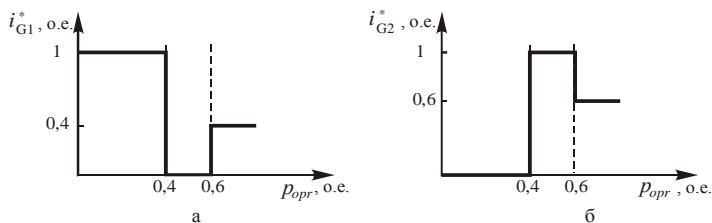


Рис. 3 – Графики распределения мощности между АГ1 и АГ2

Коэффициенты усиления PID регуляторов частоты скольжения АГ1 и АГ2 примем одинаковыми и равными: $k_{p1} = 0,176$, $k_{i1} = 0,414$, $k_{d1} = 0,01$, а коэффициенты усиления PI – регуляторов ΔU_{d1}^* и ΔU_{d2}^* [4] – $k_{p12} = 0,30$, $k_{i2} = 0,15$. Также примем $C_{d1} = 15 \cdot 10^{-2}$ Ф, $C_d = 15 \cdot 10^{-3}$ Ф, $C_{d2} = 15 \cdot 10^{-2}$ Ф, $L_y = 5 \cdot 10^{-4}$ Гн сопротивление ключей S_{y1} , S_{y2} в разомкнутом состоянии 2,5 кОм, в замкнутом – 0,005 Ом.

Из основ теории автоматического управления известно, что в случае внесения задержки по регулируемой величине в систему с настроенными регуляторами, качество установившихся процессов в ней ухудшается и система становится менее стабильной. Для повышения стабильности работы в таких системах коэффициенты усиления контуров обратной связи должны уменьшаться. Негативным результатом такого решения является ухудшение качества переходных процессов (увеличивается перерегулирование). Таким образом, алгоритмы работы регуляторов объектов с задержкой должны обеспечивать возможность определять в каком режиме, установившемся или переходом, находится система. Если режим установившийся, то коэффициенты усиления усиливающих звеньев можно и необходимо уменьшать, в другом случае (переходной режим) для усиления чувствительности (для быстрой реакции на возмущение) они должны увеличиваться. Именно исходя из этого принципа и были разработаны алгоритмы работы регуляторов частоты вращения дизелей.

Блок-схема алгоритма работы регулятора дизеля №1(2) (рис. 4), состоит из семи взаимосвязанных блоков. Заданная частота вращения вала ω_{MO}^* установлена на уровне 1 о.е. (1 о.е. = 157 рад/с). Сигнал рассогласования между относительными значениями фактической $\omega_{M1(2)}$ и заданной ω_{MO}^* частоты вращения $k_{\Delta\omega}$ поступает на входы усилительных звеньев (блоки № 3, 4, 5) и в блок контроля скорости изменения $\omega_{M1(2)}$ (блок № 1).

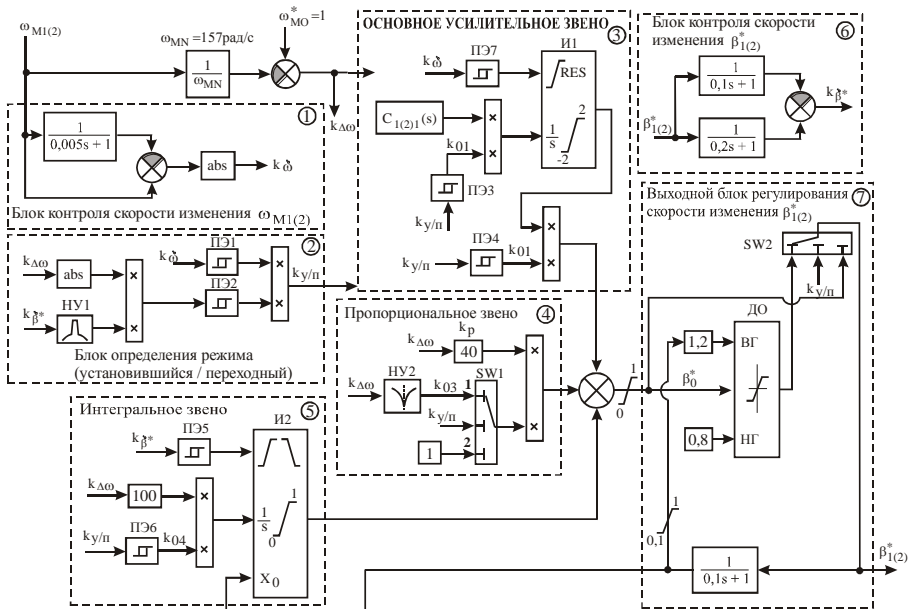


Рис. 4 – Блок-схема алгоритма работы регулятора частоты оборотов дизеля №1(2)

Основное усилительное звено (блок № 3) реализовано на основе передаточной функции $C_1(s)$. Интегратор И1 обнуляется при переходе через нуль сигнала $k_{\dot{\omega}}$. Этот сигнал пропорционален модулю производной от ω_{M1} , но получается не дифференцированием, а вычитанием сигналов $\omega_{M1(2)}$ и $\omega_{M1(2)}/(0,005s+1)$ для большей помехоустойчивости [7]. Сигнал с выхода звена $C_{11}(s)$ умножается на коэффициент k_{01} , который может принимать два значения (1 – в переходных режимах, меньше чем 1 – в установившихся). Эти значения задаются пороговым элементом ПЭ3 (см. табл. 1). В установившихся режимах также дополнительно ослабляется сигнал и на выходе И1 путем перемножения с сигналом k_{02} , который также равняется 1 в переходных режимах и меньше чем 1 в установившихся. Входной переменной для ПЭ3 и ПЭ6 является логический сигнал $k_{y/n}$, который несет в себе информацию относительно характера режима в данный момент времени ("0" – переходный режим, "1" – установившийся).

Логика определения $k_{y/n}$ достаточно проста и формулируется следующим образом: процессы в дизеле можно считать установившимися, если, во-первых, отклонение частоты вращения от уставки находится в определенных пределах;

во-вторых, скорость изменения заданного уровня подачи топлива $\beta_{1(2)}^*$ не превышает определенного значения; в-третьих, скорость изменения частоты вращения ниже заданного уровня. Исходя из этого подхода к идентификации характера режима в блоке № 2 сначала определяется произведение абсолютного значения отклонения частоты $k_{\Delta\omega}$ и усиленного нелинейным усилителем НУ1 сигнала k_{β^*} , который пропорционален скорости изменения $\beta_{1(2)}^*$ (блок № 6). Полученный сигнал поступает на вход порогового элемента ПЭ2. На вход порогового элемента ПЭ1 поступает сигнал k_{ω} пропорциональный скорости изменения $\omega_{M1(2)}$. Сигнал $k_{y/II}$ получается в результате перемножения сигналов с выходов ПЭ1, ПЭ2.

Коэффициент усиления пропорционального звена k_p (блок № 4) в переходном режиме равен 40, т.к. при $k_{y/II} = "0"$ на выходе мультиплексора SW1 присутствует сигнал, поданный на его 2-й информационный вход. В установившемся режиме ($k_{y/II} = "1"$) на выходе SW1 присутствует сигнал k_{03} , который формируется нелинейным усилителем НУ2 по сигналу $k_{\Delta\omega}$ ошибки отработки частоты вращения. Таким образом, в установившемся режиме коэффициент усиления пропорционального звена равен $k_p k_{03}$.

В интегральном звене (блок № 5) коэффициент усиления в переходном режиме равен $k_I = 100$, т.к. при $k_{y/II} = "0"$ на выходе порогового элемента ПЭ6 устанавливается $k_{04} = 1$. В установившемся режиме $k_{04} < 1$. Интегратор И2 выполняет непрерывное интегрирование и кроме этого может дискретно изменять свой выходной сигнал на значение сигнала поданного на вход X_0 . Это происходит по каждому фронту сигнала на выходе ПЭ5, т.е. в моменты времени, когда сигнал k_{β^*} пересекает заданные пороговые значения.

Сигнал k_{β^*} , как и k_{ω} , получен не прямым дифференцированием, а вычитанием выходных сигналов двух апериодических звеньев, на входы которых поступает сигнал $\beta_{1(2)}^*$.

Сигналы с выходов усилительных звеньев блоков № 3, 4, 5 суммируются и результирующий сигнал ограничивается диапазоном 0 ... 1, граничные значения которого соответствуют полностью закрытой (0) и полностью открытой (1) заслонке топливного насоса (актуатора). Далее этот сигнал поступает в блок № 7.

Единственной задачей блока № 7 является ограничение скорости изменения $\beta_{1(2)}^*$ в установившемся режиме работы дизельного двигателя. Происходит это следующим образом. Сигнал β_0^* поступает на вход

динамического ограничителя (ДО) и одновременно на вход 2 мультиплексора SW2. При $k_{y/л} = "0"$ (переходной режим) $\beta_1^* = \beta_0^*$ и таким образом ограничение скорости изменения β_1^* не происходит. В случае, когда $k_{y/л} = "1"$ (установившийся режим) величина β_1^* ограничивается диапазоном 80 ... 120 % от сигнала $\beta_1^*/(0,1s + 1)$. Следовательно, мгновенно в установившемся режиме величина β_1^* не будет изменяться больше чем на 20 % от значения сигнала на выходе аperiodического звена с постоянной времени 0,1 с. Наличие этого блока обусловлено наличием пульсаций момента генератора, которые регулятор в установившемся режиме должен «игнорировать».

Пороговые значения и выходные сигналы пороговых элементов приведены в табл. 3, а характеристики «вход-выход» нелинейных усилителей – в табл. 4.

Таблица 3 – Параметры пороговых элементов регуляторов частоты вращения дизелей

Параметр	Элемент						
	ПЭ1	ПЭ2	ПЭ3	ПЭ4	ПЭ5	ПЭ6	ПЭ7
Нижний пороговый уровень (Вход)	0,0095	0,21	0,50	0,50	-0,002	0,50	0,02
Верхний пороговый уровень (Вход)	0,0100	0,22	0,51	0,51	0,002	0,51	0,04
Выходной сигнал при превышении верхнего уровня	0	0	0,25	0,50	0	0,25	0
Выходной сигнал при уменьшении ниже нижнего уровня	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 4 – Характеристики вход-выход нелинейных усилителей регуляторов частоты вращения Д1, Д2.

НУ1	Вход	-0,040	-0,010	-0,002	0	0,002	0,010	0,040
	Выход	1	0,500	0,200	0	0,200	0,500	1
НУ2	Вход	-0,1	-0,02	-0,01	0	0,01	0,02	0,1
	Выход	0,4	0,50	1	1	1	0,50	0,4

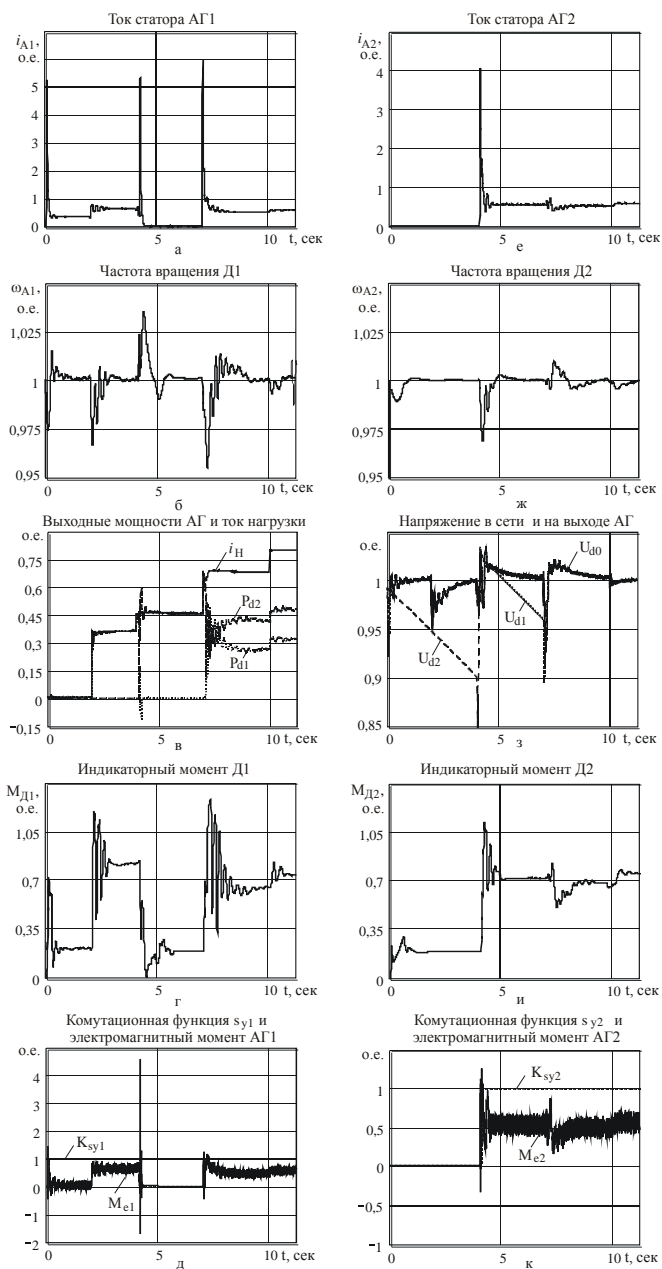


Рис. 5 – Временные осциллограммы электромеханических процессов
 Звенья $C_{11}(s)$ и $C_{12}(s)$ имеют передаточные функции ($\delta \rightarrow 0$)

$$C_1(s) = \frac{30}{s} \cdot \frac{s+1}{0,0059s+1} \cdot \frac{0,047s+1}{\delta s+1}, \quad C_2(s) = \frac{30}{s} \cdot \frac{1,56s+1}{0,0059s+1} \cdot \frac{0,047s+1}{\delta s+1}.$$

Система регулирования частоты оборотов Д2 отличается от системы Д1 тем, что элемент с передаточной функцией $C_{11}(s)$ заменяется на $C_{21}(s)$.

Результаты исследований.

Результаты моделирования электромеханических процессов в рассматриваемой АЭ при использовании регуляторов частоты вращения (рис. 4) приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что величина амплитуды пульсаций напряжения в сети U_{a0} в установившихся режимах не выходит за пределы 0,2 % (рис. 5 з). Переходные процессы в Д1, Д2 затухают за время не больше чем 2 с, причем наиболее длительный переходной процесс наблюдаются после включения АГ1 на параллельную работу с АГ2. Максимальное отклонение частоты оборотов Д1 составляет около 4,5 %, а Д2 – 3,5 %. Величина амплитуды пульсаций электромагнитного момента в АГ1 находится в пределах 29...33 %, в АГ2 – 27...30 %.

Переходные процессы в дизелях (рис. 5 б, ж, г, и) имеют явно выраженный колебательный характер. Тот факт, что в установившихся режимах амплитуда пульсаций индикаторного момента дизелей несопоставимо мала по сравнению с величиной пульсаций электромагнитного момента соответствующих АГ, свидетельствует про хорошую фильтрующую способность регуляторов частоты вращения в установившихся режимах. Из анализа соотношения графиков изменения выходных мощностей АГ (рис. 5 в) видно, что они соответствуют заданным (рис. 3). Также необходимо отметить наличие больших по величине действующих значений статорных токов в начале возбуждения АГ и в момент снятия возбуждения. Это связано с тем, что эти процессы начинаются при больших начальных напряжениях в цепях статора. В реальных системах этих всплесков можно избежать, если начальное возбуждение начинать с малых напряжений и переводить АГ в развозбужденное состояние не закорачиванием его обмоток, а запирианием всех транзисторов ВП.

Выводы

Проведено численное исследование электромеханических процессов в дизельной автономной энергосистеме постоянного тока, выполненной на основе асинхронных генераторов с вентильным возбуждением по цепям статора. Предложен и опробован алгоритм управления электронными регуляторами частоты вращения дизелей. Результаты расчетов подтвердили корректность использования предложенных ранее авторами моделей и работоспособность алгоритмов управления.

Список литературы: 1. Мазуренко Л. И., Лищенко А. И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. – К.: Наук. думка, 2011. – 271 с. 2. Мазуренко Л. И., Джура О. В., Попович О. М., Гребенников В. В. та інші. Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2013. – Вип. № 35. – С. 58 – 67. 3. Мазуренко Л. И., Джура О. В., Диннік Л. М., Білик О. А. Математична модель асинхронних генераторів з вентильним збудженням автономної енергосистеми постійного струму // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. № 2/2013 (22). – Ч. 2. – С. 321 – 326. 4. Мазуренко Л. И., Джура О. В., Романенко В. И., Шевчук Н. И. Алгоритм розподілу потужності в автономній енергосистемі з асинхронними вентильними генераторами // Вісник НТУ "ХПІ". Серія "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" (тем вип.). – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 36(1009). – С. 376 – 377. 5. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. 6. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1975. – 496 с. 7. Ракан Аль-Сліхат. Удосконалення захисту електромеханічної системи скіпового доменного підйомника при аварійних механічних перевантаженнях: Автореф. дис. на здобуття ступені канд. техн. наук. – Донецьк. – 2013. – 20 с.

Bibliography (transliterated): 1. Mazurenko L. I., Lischenko A. I. Asinhronnyie generatoryi s ventilnyim i ventilno-emkostnyim vzbuzhdeniem dlya avtonomnyih energoustanovok. – K.: Nauk. dumka, 2011. – 271 P. [Print] 2. Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Popovich O. M., Grebenikov V.V. ta Inshi. Elektrichni generatoryi i dviguni zmlnogo strumu. Elektromehanotronni peretvoryuvachi energiyi. Pr. In-tu elektrodinamiki NAN Ukrainy: Zb. nauk. pr. – K.: IED NAN Ukrainy. – 2013. – Vip. No 35. – P. 58 – 67 [Print]. 3. Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Dinnik L. M., Bilik O. A. Matematichna model asinhronnih generatoriv z ventilnim zbudzhennyam avtonomnoyi energosistemi postoiynogo strumu. Elektromehanični i energozberigayuchi sistemi. Schokvartalniy naukovovirobnichiy zhurnal. – Kremenchuk: KrNU. – 2013. – Vip. No 2/2013 (22). – Ch. 2. – P. 321 – 326. [Print] 4. Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Romanenko V. I., Shevchuk N. I. Algoritm rozpodilu potuzhnosti v avtonomniy energosistemi z asinhronnimi ventilnimi generatorami. Visnik NTU "HPI". Seriya "Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika" (tem vip.). – Harkiv: NTU "HPI". – 2013. – No 36(1009). – P. 376 – 377. [Print] 5. GOST 10511-83. Sistemyi avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya (SARCh) sudovih, teplovoznyih i promyishlennyih dizeley. 6. Kopyilov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. Uchebnoe posobie dlya vuzov. – M.: Energiya, 1975. – 496 P. [Print] 7. Rakan Al-Slihat. Udoskonalennya zahistu elektromehaničnoy sistemi skipovogo domennoyego pid'yomnika pri avariynih mehanichnih perevantazhennyah: Avtoref. dis. na zdobuttya stupeni kand. tehn. nauk. – Donetsk. – 2013. – 20 P. [Print]

Надійшла (received) 10.09.2014



Мазуренко Леонид Иванович
д-р техн. наук, профессор, зав. отделом электромеханических систем
Института электродинамики НАН Украины
E-mail: mlins@ied.org.ua



Джура Александр Васильевич
канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИЭД НАН Украины



Романенко Владимир Иванович
канд. техн. наук, науч. сотр. ИЭД НАН Украины