

**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)

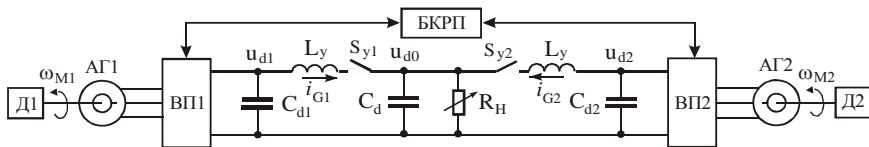


Рис. 1 – Схема силовой части АЭ

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 ( $\tau_A$ ) и поршневой системы ( $\Theta$ ) [3].

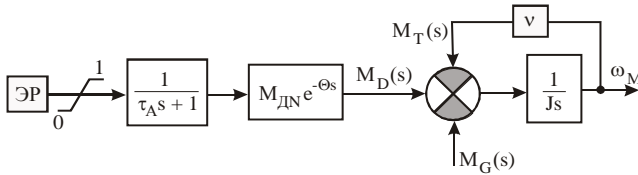


Рис. 2 – Упрощенная модель дизеля с разомкнутой обратной связью по частоте вращения

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  $P_{HV}$  (принимая 125 кВт), мощность, которая потребляется сетью от генераторов в установившемся режиме. Из рис. 3 видно, что при нагрузке до 40 % от  $P_{HV}$  должен работать только АГ1, от 40 % до 60 % – АГ2, от 60 % и больше – оба АГ, распределяя мощность в отношении 1:1,5.

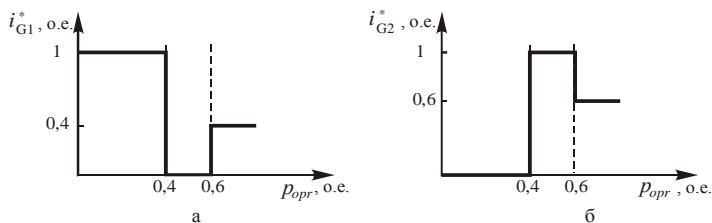


Рис. 3 – Графики распределения мощности между АГ1 и АГ2

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  $\Delta U_{d1}^*$  и  $\Delta U_{d2}^*$  [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  $\omega_{MO}^*$  установлена на уровне 1 о.е. (1 о.е. = 157 рад/с). Сигнал рассогласования между относительными значениями фактической  $\omega_{M1(2)}$  и заданной  $\omega_{MO}^*$  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).

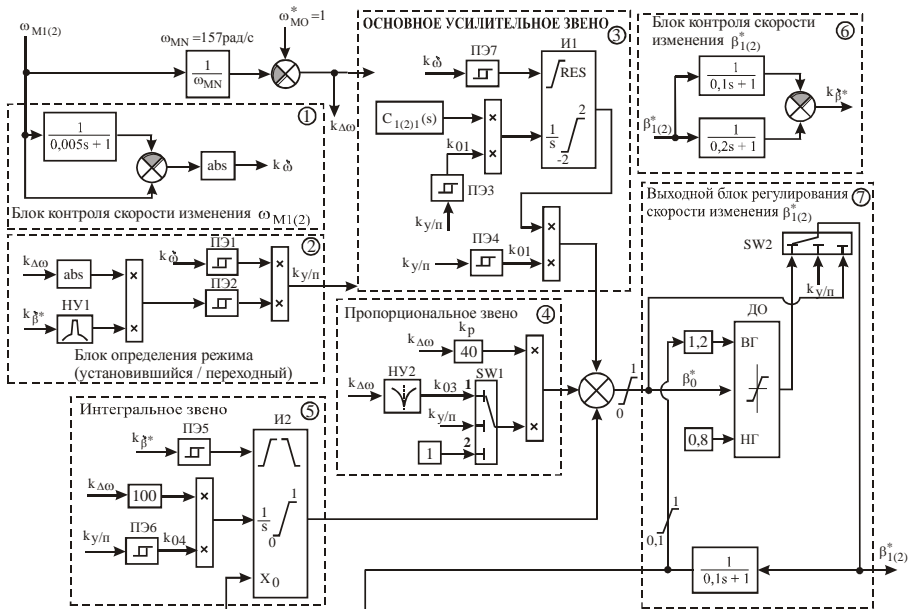


Рис. 4 – Блок-схема алгоритма работы регулятора частоты оборотов дизеля №1(2)

Основное усилительное звено (блок № 3) реализовано на основе передаточной функции  $C_{1(2)}(s)$ . Интегратор И1 обнуляется при переходе через нуль сигнала  $k_{\dot{\omega}}$ . Этот сигнал пропорционален модулю производной от  $\omega_{M1}$ , 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  $k_{\beta^*}$ , который пропорционален скорости изменения  $\beta_{1(2)}^*$  (блок № 6). Полученный сигнал поступает на вход порогового элемента ПЭ2. На вход порогового элемента ПЭ1 поступает сигнал  $k_{\omega}$  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  $k_{\beta^*}$  пересекает заданные пороговые значения.

Сигнал  $k_{\beta^*}$ , как и  $k_{\omega}$ , 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  $\beta_0^*$  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  $\beta_1^*$  не происходит. В случае, когда  $k_{y/л} = "1"$  (установившийся режим) величина  $\beta_1^*$  ограничивается диапазоном 80 ... 120 % от сигнала  $\beta_1^*/(0,1s + 1)$ . Следовательно, мгновенно в установившемся режиме величина  $\beta_1^*$  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

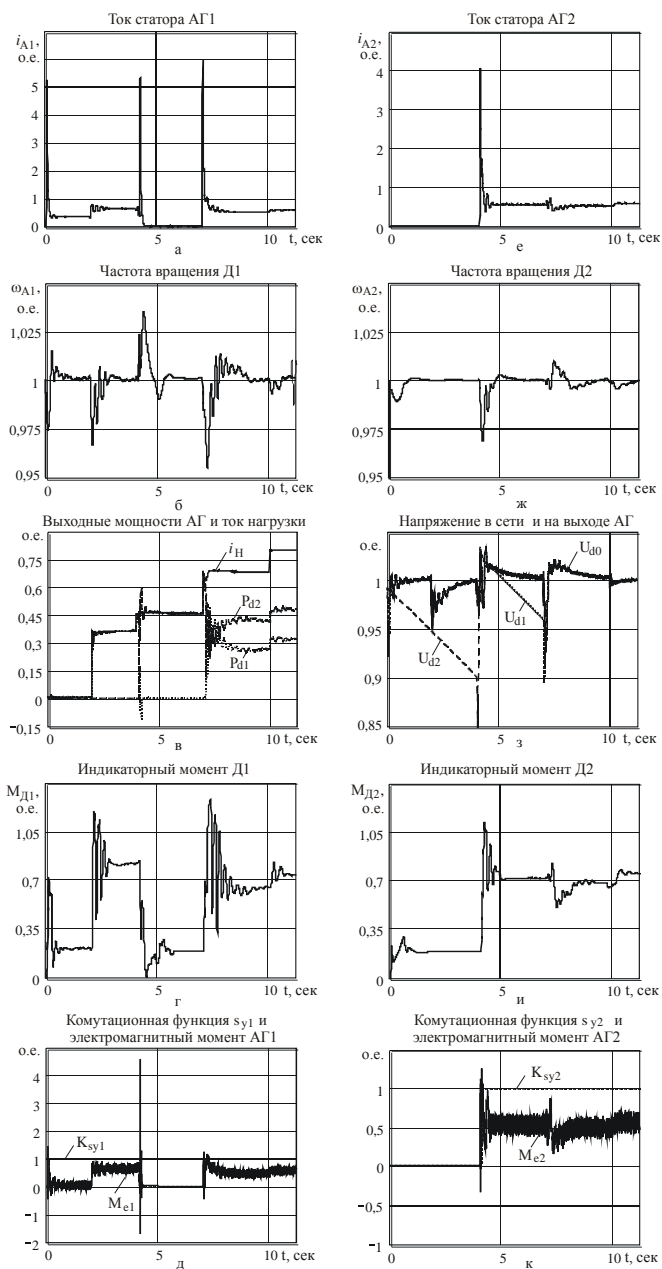


Рис. 5 – Временные осциллограммы электромеханических процессов  
 Звенья  $C_{11}(s)$  и  $C_{12}(s)$  имеют передаточные функции ( $\delta \rightarrow 0$ )



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

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 электронных регуляторов 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. Электричні 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., Динник 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 скипового 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 vobuzhdeniem 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 vrascheniya (SARCh) sudovih, teplovoznyih i promyshlennyih dizeley. 6. Kopylov 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