

Разработка модели классической машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением и последовательной ёмкостной стабилизацией напряжения

ДЖЕНДУБАЕВ А.-З.Р., БАРАХОЕВ Р.Ю., ДЖЕНДУБАЕВ Э.А.-З.

Предложена математическая модель системы, состоящей из классической машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением (генератор) и последовательной ёмкостной стабилизацией напряжения. Модель разработана с использованием SimPowerSystems. Выявлены особенности внешней характеристики генератора при различных значениях ёмкости конденсаторов последовательной ёмкостной стабилизации и различных коэффициентах мощности нагрузки. Приведены графики динамических режимов при набросе и сбросе нагрузки, а также при двухфазном коротком замыкании. Представлены расчетные и экспериментальные внешние характеристики генератора, которые свидетельствуют об адекватности математической модели.

Ключевые слова: машина двойного питания, последовательная ёмкостная стабилизация напряжения, конденсаторное самовозбуждение, моделирование, САПР, SimPowerSystems, MATLAB

Известно, что при увеличении активной или активно-индуктивной нагрузки генераторов переменного тока напряжение снижается. Для стабилизации напряжения применяют различные способы, в том числе и последовательную ёмкостную стабилизацию (компаундирование) напряжения (ПЕСН). Такой способ применительно к асинхронным и синхронным генераторам достаточно подробно описан в [1–4]. Из работ, посвященных стабилизации напряжения классической машины двойного питания (КМДП) с конденсаторным самовозбуждением, можно отметить работу [5].

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований КМДП и асинхронного генератора (АГ), реализованных на базе одной и той же машины серии МТ-11-6 (2,2 кВт) путем соответствующих переключений обмоток. Следует отметить, что обмотка статора экспериментальной КМДП намотана так, что ее ЭДС приблизительно равна ЭДС обмотки фазного ротора, т.е. $E_1 \approx E_2$. Представленные в статье внешние характеристики генераторов при использовании одних и тех же батарей конденсаторов для возбужде-

ния генераторов и ПЕСН показали, что КМДП имеет более жесткие внешние характеристики, чем АГ. Это стало причиной разработки соответствующей математической модели и проведения теоретических исследований КМДП с ПЕСН.

Электрическая схема КМДП с конденсаторным самовозбуждением и ПЕСН представлена на рис. 1. Обмотки статора 1 и фазного ротора 2 генератора соединены параллельно с противоположным чередованием фаз. Для работы генератора на холостом ходу используются конденсаторы возбуждения 3 (C_B). Стабилизация напряжения на нагрузке 4 ($Z_{нагр}$) осуществляется за счет конденсаторов ПЕСН 5 (C_K – ёмкость компаундирующих конденсаторов, т.е. конденсаторов ПЕСН). Ротор КМДП приводится во вращение с помощью двигателя б, например двигателя внутреннего сгорания. Следует отметить, что при частоте напряжения 50 Гц вал двухполюсной КМДП вращается с частотой 6000 об/мин (ω_p), что позволяет удвоить мощность КМДП по сравнению с АГ и увеличить КПД.

При создании математической модели всей системы за основу возьмем математическую модель КМДП и её реализацию в виде блока Subsystem DFIG расширения SimPowerSystems, которая была предложена в [6]. Дополним её блоками конденсаторов возбуждения C_b ёмкостью 550 мкФ и компаундирующих конденсаторов C_k (1200 мкФ) и блоком с активным сопротивлением и индуктивностью нагрузки. Также воспользуемся стандартными блоками из библиотек Simulink и SimPowerSystems для измерения, преобразования, вывода и записи результатов расчета. В результате получим модель (рис. 2), которая позволяет исследовать как динамические, так и статические режимы работы системы КМДП с ПЕСН.

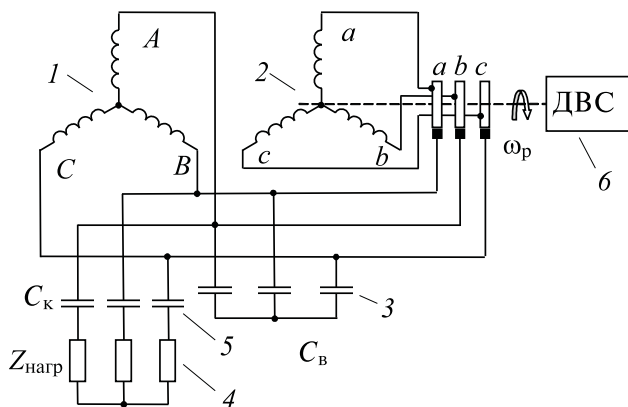


Рис. 1

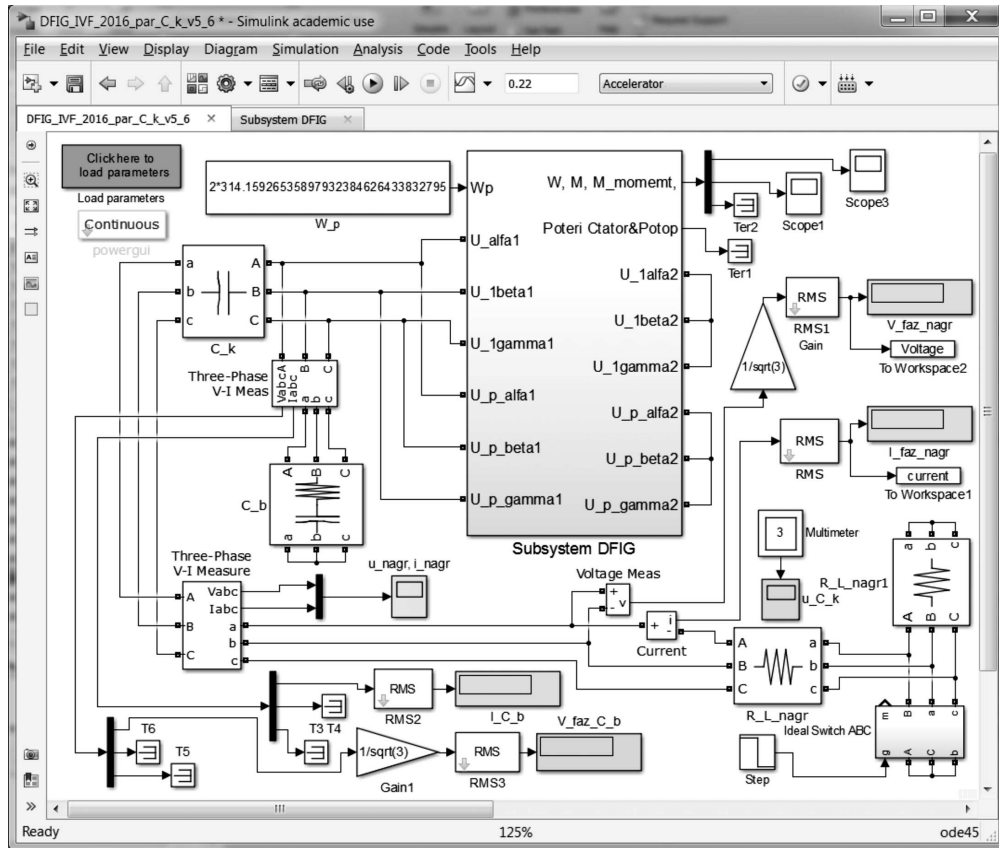


Рис. 2

Для оценки адекватности полученной модели рассчитаем внешнюю характеристику КМДП с ПЕСН и сравним результаты с экспериментом. При расчете дискретно уменьшаем сопротивление нагрузки, время расчета выбираем таким, чтобы переходный процесс, связанный с уменьшением сопротивления нагрузки, завершился установившимся режимом, например $t=0,25$. Последние значения тока и напряжения нагрузки, полученные в ходе расчета, записываются в соответствующие переменные, что в дальнейшем позволяет построить внешнюю характеристику генератора.

Для запуска модели (рис. 2) и реализации алгоритма, описанного выше, разработан *m*-файл, текст которого приведен в приложении. При его разработке использовался подход, изложенный в [7].

Внешние характеристики генератора, полученные в ходе эксперимента (точки) и расчета (сплошная линия) при подключении активной нагрузки и емкости ПЕСН $C_K = 1200$ мкФ, представлены на

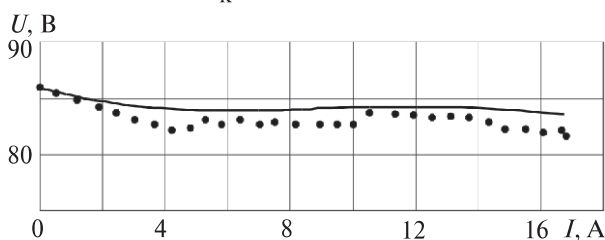


Рис. 3

рис. 3. Они свидетельствуют о хорошей сходимости результатов расчета и эксперимента. К сожалению, получить экспериментальные данные при больших значениях тока не удалось в связи с техническими ограничениями лабораторного оборудования. В качестве приводной машины использовался серийный двигатель МТ-11-6 (2,2 кВт), статор и ротор которого были подключены к сети по схеме машины двойного питания.

При проектировании особое внимание уделяется оптимизации всех параметров электрической машины или системы в целом. Поскольку это достаточно сложная задача, то рассмотрим одну из её частей. Например, оценим влияние характера нагрузки и емкости конденсаторов ПЕСН на внешние характеристики генератора.

На рис. 4 представлены результаты расчета внешних характеристик генератора, которые получены при неизменных параметрах генератора и емкости конденсаторов возбуждения $C_B = 555$ мкФ. Кривые 1–4 получены, соответственно, при $\cos\varphi_{нагр} = 1$ и следующих значениях емкости конденсаторов ПЕСН C_K , равных 0; 1200 и 1400 мкФ, а кривая 5 – при $\cos\varphi_{нагр} = 0,95$ и $C_K = 1200$ мкФ. Внешняя характеристика КМДП при отсутствии ПЕСН, т.е. $C_K = 0$, и чисто активной нагрузке (кривая 1) получается мягкой. При перегрузке или трехфазном коротком замыкании КМДП теряет

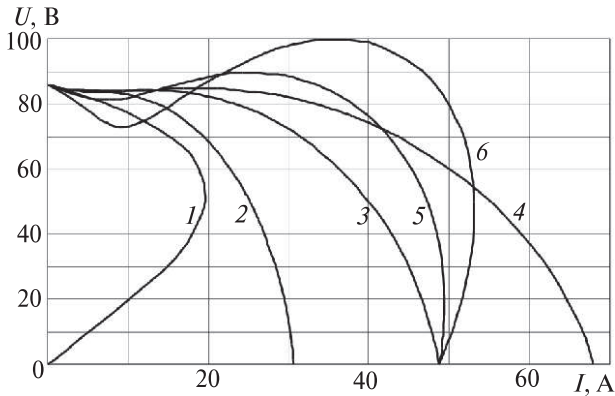


Рис. 4

возбуждение. При наличии ПЕСН в виде конденсаторов емкостью $C_k = 800$ мкФ внешняя характеристика становится более жесткой (кривая 2) и при этом, как и следовало ожидать, КМДП не теряет возбуждение при коротком замыкании и перегрузке. По мере увеличения емкости конденсаторов ПЕСН (кривая 3 — $C_k = 1200$ мкФ, кривая 4 — $C_k = 1600$ мкФ) растет диапазон значений токов нагрузки, при котором напряжение остается стабильным.

Следует отметить, что характер нагрузки оказывает заметное влияние на вид кривой внешней характеристики. При активно-индуктивной нагрузке на начальном этапе наблюдается снижение напряжения до некоторого минимального значения (первый экстремум), затем происходит его увеличение до некоторого максимального значения (второй экстремум), после которого напряжение вновь снижается до точки короткого замыкания. Таким образом, при $C_k = 1200$ мкФ, $\cos \varphi_{\text{нагр}} = 0,95$ на кривой появляются два экстремума (кривая 5). Дальнейшее снижение коэффициента мощности усиливает эту тенденцию. Например, при $C_k = 1200$ мкФ,

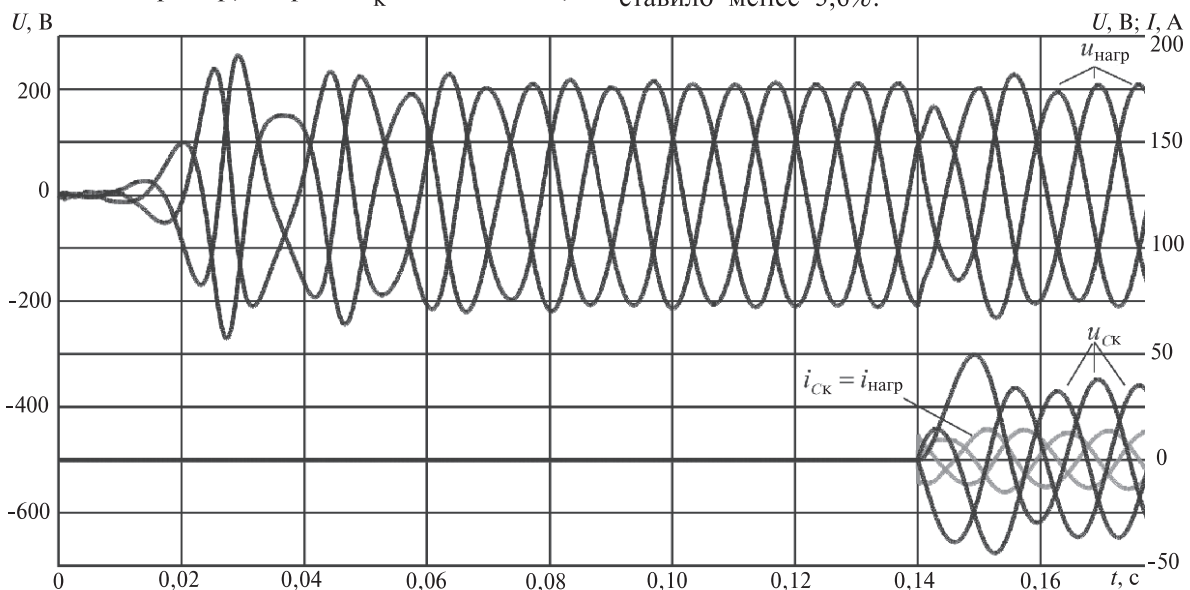


Рис. 5

$\cos \varphi_{\text{нагр}} = 0,85$ (кривая 6) напряжение выходит за границы допустимых значений, которые обычно лежат в диапазоне $\pm 5\%$ номинального. Естественно, при таком коэффициенте мощности ПЕСН становится неэффективной.

Наряду со статическими режимами интерес представляет исследование динамических режимов, протекающих в КМДП с ПЕСН при самовозбуждении, набросе и сбросе нагрузки. Результаты расчета динамических режимов представлены на рис. 5.

Кривые в верхней части рис. 5 относятся к линейным напряжениям $u_{\text{нагр}}$, к которым подключена симметричная трехфазная активная нагрузка. Фазное сопротивление нагрузки составляет $R_{\text{нагр}} = 8,86$ Ом. Более светлым цветом обозначены кривые токов, протекающих в конденсаторах ПЕСН ($C_k = 1200$ мкФ) и нагрузке ($i_{Ck} = i_{\text{нагр}}$). При самовозбуждении и набросе нагрузки ($t = 0,14$ с) в кривых напряжений нагрузки $u_{\text{нагр}}$ и конденсаторов ПЕСН u_{Ck} возникают аperiodические составляющие, которые интенсивно затухают.

Несколько иная картина при сбросе нагрузки ($t = 0,02$ с) и работе в режиме холостого хода (рис. 6). В этом случае в кривых линейных перенапряжений $u_{\text{нагр}}$ (в верхней части рис. 6) возникают значительные аperiodические составляющие, которые не затухают.

Причина этого в том, что при разрыве цепи нагрузки на обкладках конденсаторов остаются заряды, а следовательно, и соответствующие остаточные напряжения. Следует отметить, что наличие таких напряжений подтверждают не только результаты расчета, но и эксперимента, причем расхождение между их установившимися значениями составило менее 3,6%.

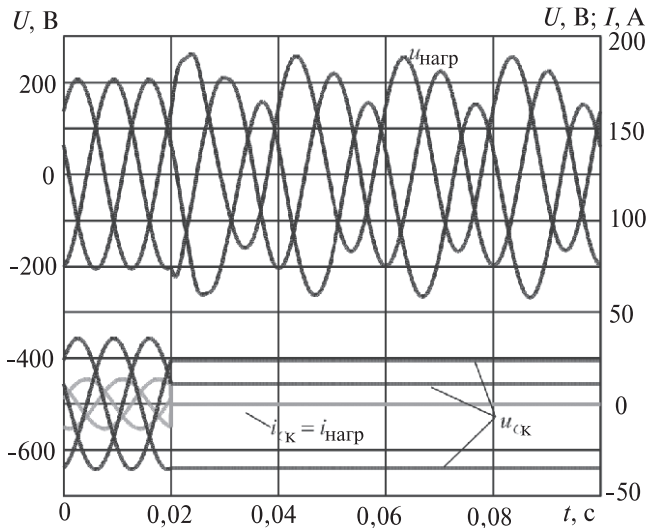


Рис. 6

Следует подчеркнуть, что затухание апериодической составляющей напряжения генератора происходит только в том случае, если сбрасывается только часть нагрузки. В этом случае активные сопротивления оставшейся части нагрузки создают контуры, благодаря которым и происходит разряд остаточных зарядов конденсаторов ПЕСН. Результаты расчета такого динамического режима представлены на рис. 7. Сброс части нагрузки моделируется увеличением сопротивления нагрузки $R_{нагр}$ с 8,86 до 88,6 Ом, которое осуществляется при достижении расчетного времени $t=0,02$ с.

Отметим, что динамические режимы при трехфазном коротком замыкании на клеммах нагрузки КМДП качественно не отличаются от аналогичных режимов, протекающих в асинхронном генераторе. В этом режиме конденсаторы ПЕСН находятся под фазным напряжением генератора, что сопровождается увеличением их реактивной мощности, ростом намагничивающего тока и напряжения, а также

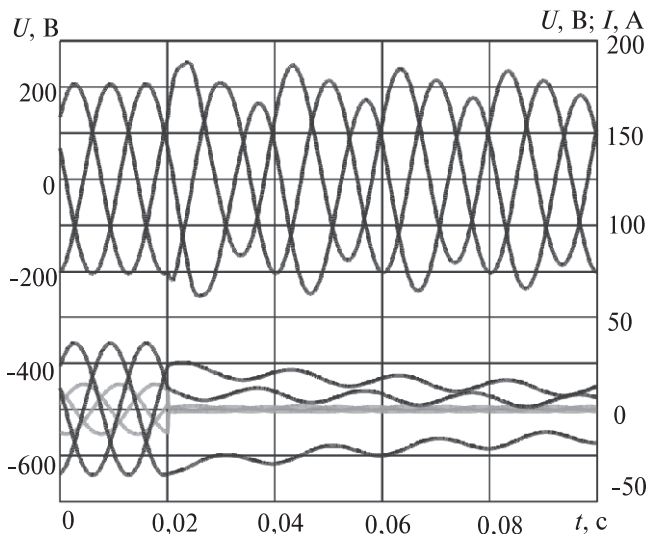


Рис. 7

значительным насыщением магнитной системы. Что касается токов и напряжений генератора, то они остаются синусоидальными.

При несимметричной нагрузке или несимметричном КЗ в кривых токов и напряжений возникают высшие гармоники. На рис. 8 представлены результаты расчета двухфазного КЗ в КМДП с ПЕСН, подтверждающие сказанное выше.

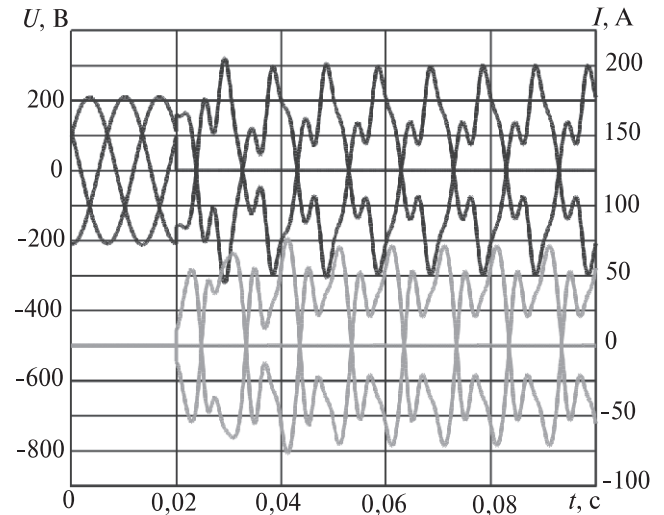


Рис. 8

Следует подчеркнуть, что по этому показателю КМДП с ПЕСН заметно уступает АГ с ПЕСН, поскольку в кривой тока последнего существенно меньше высших гармоник. Результаты гармонического анализа этих генераторов, а также значения коэффициентов гармонических искажений (КГИ) представлены в таблице. Гармоники, значения которых составляют менее 1% основной, в таблице не показаны. При расчете значение частоты основной гармоники КМДП принималось $f_{\nu 1} = 50$ Гц, а АГ – $f_{\nu 1} = 49,17$ Гц. Расчеты проведены с помощью инструмента FFT Analysis блока powergui.

Номер гармоники	КМДП с ПЕСН	АГ с ПЕСН
1	100%	100%
3	53,27%	7,69%
5	12,28%	1,24%
7	5,35%	—
КГИ	54,94%	7,81%

Следует отметить, что не только при несимметричном КЗ, но и при несимметричной нагрузке аналогичное сравнение кривых токов, протекающих в генераторах, будет не в пользу КМДП. Преимущество АГ объясняется наличием короткозамкнутой обмотки ротора, которая демпфирует влияние высших гармоник поля в зазоре машины, что,

в свою очередь, улучшает форму ЭДС, напряжений и токов генератора.

При двухфазном КЗ наряду с искажениями кривых заметно возрастают пиковые значения линейных напряжений между закороченными фазами и свободной фазой, что может негативно влиять на электроприемники.

```

Приложение. % Загрузка модели
open('DFIG_IVF_2016_par_C_k_v5_6.slx')
temp = 0; % Вспомогательная переменная
f_1=50; % Частота ЭДС
cos_Fi = 1; %0.95; % Коэфф. мощности нагруз-
ки
Fi = acos(cos_Fi);
% Цикл расчета
for R = [2500, 500, 100, 50, 25, 15, 12, 10, 9, 8, 7,
6, ... 5, 4, 3.5, 3, 2.8, 2.5, 2.2, 2, 1.7, 1.5, 1.2, 1, ...
0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0.05, 0.001];
if temp==0
    xFinal= xFinal_XX;
end
xInitial = xFinal;
temp = temp + 1;
disp(['Количество рассчитанных точек    N =',
num2str(temp)])
disp(['Значение активного сопротивления R =',
num2str(R)])
% Присвоение значения сопротивлению R:
set_param('DFIG_IVF_2016_par_C_k_v5_6/R_L_
nagr',...
'Resistance',num2str(R));
% Присвоение значения индуктивности
L = R*tan(Fi)/(2*pi*f_1)
set_param('DFIG_IVF_2016_par_C_k_v5_6/R_L_
nagr',...
'Inductance',num2str(L));
sim('DFIG_IVF_2016_par_C_k_v5_6'); % Запуск
модели
% Определение длины массивов current и
Voltage
pazm = length(current);
% Запись в Workspace последнего значения мас-
сива
current_end(temp) = current(pazm) ;
Voltage_end(temp) = Voltage(pazm) ;

```

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 12, pp. 34–39.

```

R_var(temp) = R;
% Транспонирование
current_end_colon = current_end' ;
Voltage_end_colon = Voltage_end' ;
R_var_colon      = R_var';
end

```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. — М.: Высшая школа, 1990, 416 с.
3. Алишин Г.Н., Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы повышенной частоты. — М.: Машиностроение, 1974, 352 с.
4. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. — М.: Знак, 1998, 288 с.
5. Барахоев Р.Ю., Джэндубаев Э.А.-З. Экспериментальные исследования последовательной емкостной стабилизации напряжения классической машины двойного питания и асинхронного генератора. — XV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». — Алушта, 21–27 сентября 2014 г., с. 303–305.
6. Джэндубаев А.-З.Р., Барахоев Р.Ю., Джэндубаев Э.А.-З. Моделирование асинхронного генератора и классической машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением в среде MatLab-Simulink-SimPowerSystems. — Электричество, 2013, № 7, с. 46–51.
7. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. — СПб.: Питер; М.: ДМК Пресс, 2008, 288 с.
8. Барахоев Р.Ю. Динамические режимы автономной классической машины двойного питания с последовательной емкостной стабилизацией напряжения. Материалы VII Международной научной конф. «Технические и технологические системы», Краснодар, 2015, с. 89–94.

[02.06.2016]

А в т о р ы: Джэндубаев Абрек-Заур Рауфович окончил в 1980 г. энергостроительный факультет филиала Ставропольского политехнического института (г. Черкесск). Докторскую диссертацию «Автономные асинхронные генераторы с конденсаторным самовозбуждением (развитие теории и практики)» защитил в МЭИ в 2007 г. Профессор кафедры электроснабжения Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии (Сев-КавГГТА).

Барахоев Рашид Юнусович окончил в 2008 г. Институт строительства и электроэнергетики Сев-КавГГТА. Директор отделения «Энергосбыт» Ингушского филиала ПАО «МРСК Северного Кавказа».

Джэндубаев Эдуард Абрек-Заурович — студент Института электроэнергетики, электроники и нанотехнологий Северо-Кавказского федерального университета.

Elaborating the Model of a Classic Double-Fed Machine with Capacitor Self-Excitation and Series Capacitive Stabilization of Voltage for Computer-Aided Designing

Dzhendubayev Abrek-Zaur Raufovich (North-Caucasian State Humanitarian and Technological Academy, Cherkessk, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)