

* * *

Моделирование асинхронного генератора и машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением

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

Описывается блок, созданный для *SimPowerSystems*, с помощью которого можно исследовать асинхронный генератор и машину двойного питания с конденсаторным самовозбуждением. Существенным отличием разработанного блока от стандартных, представленных в библиотеке *SimPowerSystems*, является возможность доступа как к началу, так и к концу трехфазных обмоток статора и ротора асинхронной машины, что расширяет его функциональные возможности, в частности, позволяет создать модель машины двойного питания с конденсаторным самовозбуждением.

Ключевые слова: асинхронный генератор, машина двойного питания, конденсаторное самовозбуждение, моделирование

Известно, что асинхронные генераторы (АГ) с конденсаторным самовозбуждением находят применение в бензоэлектрических агрегатах и МГЭС. В ветроэнергетических установках (ВЭУ) широкое распространение получили машины двойного питания (МДП) с преобразователем частоты в цепи фазного ротора [1]. Намечается использование в ВЭУ и близких по конструкции к МДП асинхронизированных генераторов [2].

При постоянной частоте вращения, например в бензоагрегатах, можно использовать классическую

A program module developed for the *SimPowerSystems* environment using which it is possible to study an asynchronous generator and a double-fed machine with capacitor self-excitation is described. The essential feature in which the developed module differs from the standard ones available in the library of the *SimPowerSystems* package is that both the beginnings and ends of the three-phase stator and rotor windings of an asynchronous machine are accessible. Owing to this feature, the developed module has extended functional capacities; in particular, it is possible to construct the model of a double-fed machine with capacitor self-excitation.

Key words: asynchronous generator, double-fed machine, capacitor self-excitation, simulation

МДП с конденсаторным самовозбуждением [3, 4]. Обмотки статора и фазного ротора этой машины включаются параллельно или последовательно, причем их ЭДС равны. При таком включении ротор двухполюсной машины при частоте ЭДС 50 Гц вращается с частотой $n_p = 6000$ об/мин, а мощность по сравнению с асинхронной машиной с фазным ротором, работающей в обычном режиме, удваивается.

Известно, что использование современных программных продуктов визуального блочного имита-

ционного моделирования для научно-технических расчетов в электротехнике и электроэнергетике, таких как MATLAB и его пакеты расширения Simulink и SimPowerSystems, существенно повышает эффективность исследований при наличии соответствующих стандартных блоков [5–7].

К сожалению, существующий стандартный блок Asynchronous Machine из библиотеки Machines пакета расширения SimPowerSystems не позволяет исследовать конденсаторное самовозбуждение. Во-первых, это связано с тем, что при подключении к стандартному блоку Asynchronous Machine конденсаторов возбуждения и активизации опции Simulate saturation (моделирование нелинейности) машину не удастся перевести в режим конденсаторного самовозбуждения. Во-вторых, обмотки в блоке Asynchronous Machine невозможно соединить последовательно, так как концы обмоток в этом блоке недоступны.

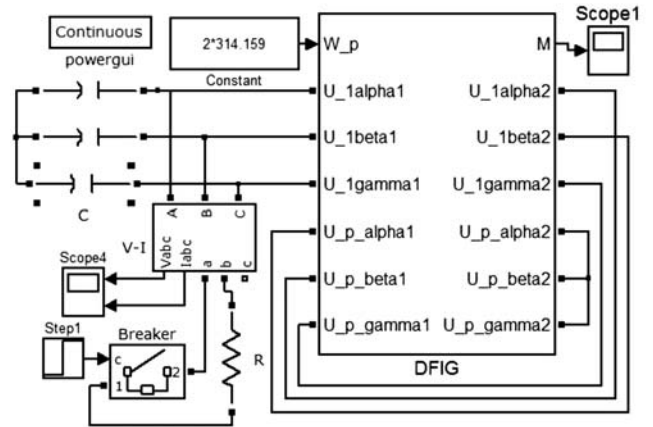


Рис. 1

Отсутствие конденсаторного самовозбуждения, возможно, связано с тем, что метод аппроксимации, используемый в этом блоке, изначально разрабатывался только для двигательного режима и не учитывал особенностей работы в генераторном ре-

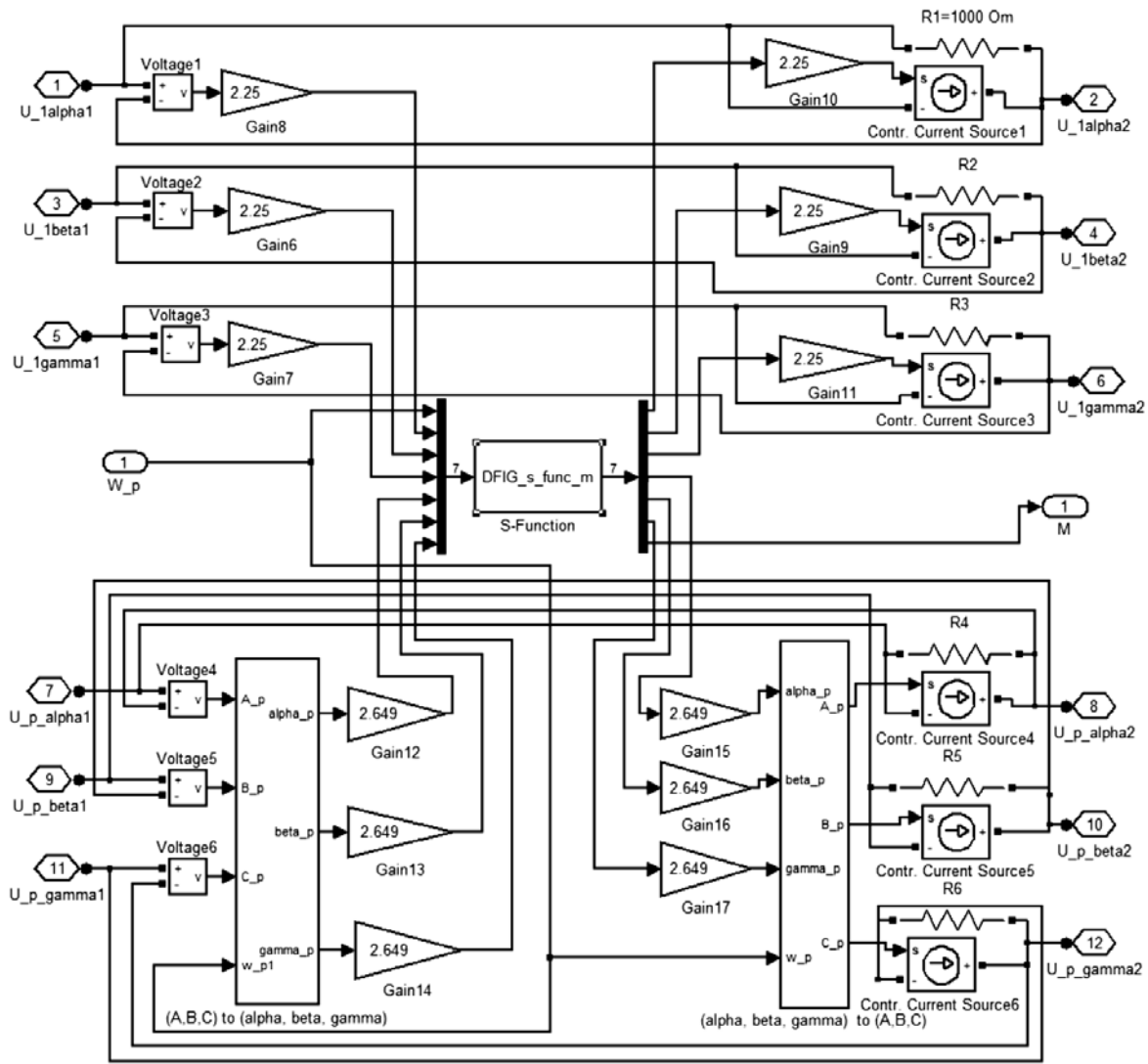


Рис. 2

жиме с конденсаторным самовозбуждением. Следует отметить, что при отключенной опции Simulate saturation самовозбуждение наступает, однако при отсутствии нелинейности амплитуда колебаний стремится к бесконечности, что неприемлемо.

Таким образом, создание электротехнического блока машины двойного питания с полностью доступными клеммами (выводами) обмоток и нелинейностью, обеспечивающей моделирование генераторного режима с конденсаторным самовозбуждением, позволит использовать всю силу среды Matlab-Simulink-SimPowerSystems при исследовании генераторного режима с конденсаторным самовозбуждением асинхронной машины и классической МДП.

Вопросу создания такого блока посвящена данная статья.

При создании блока воспользуемся известными уравнениями машины, представленными в так на-

зываемой заторможенной трехфазной системе координат a, b, g [8]. Дополним эти уравнения выражением, с помощью которого учтем изменение взаимной индуктивности при насыщении магнитной цепи, например формулой Фрелиха, и выражениями, которые позволяют преобразовывать напряжения и токи ротора из неподвижной в синхронную систему координат, вращающуюся с частотой $\omega = \omega_p / 2$, и обратно [9]. На основе этих уравнений создан электротехнический блок генератора, к которому подключены другие стандартные блоки из библиотек Simulink и SimPowerSystems [5, 6].

SimPowerSystems-модель МДП с последовательно соединенными обмотками и конденсаторным самовозбуждением при подключении однофазной нагрузки представлена на рис. 1. Основой модели является разработанный электротехнический блок DFIG (Doubly fed induction generator), изображенный на рис. 2 и состоящий из трех подсистем.

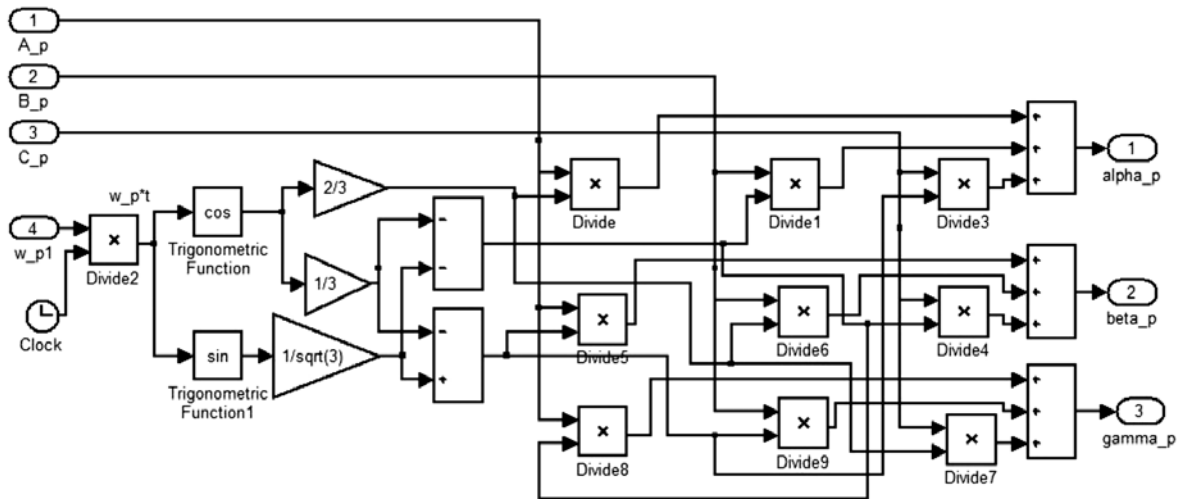


Рис. 3

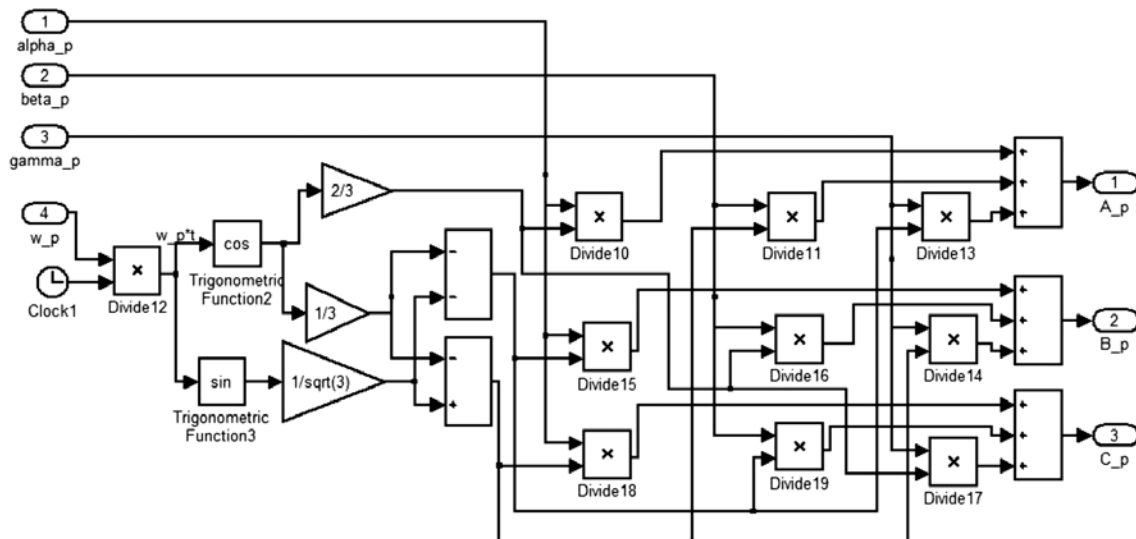


Рис. 4

Первая подсистема S-Function является Simulink-функцией, которая написана на основе шаблона, размещенного на сайте [6]. Текст функции представлен в приложении 1 в виде *m*-файла. В этой функции дано математическое описание генератора: нелинейная зависимость взаимной индуктивности от намагничивающего тока; система линейных уравнений для определения токов через потокосцепления и индуктивности; система дифференциальных уравнений. Вторая подсистема преобразует напряжения ротора из вращающейся в неподвижную систему координат (рис. 3), а третья преобразует ток из неподвижной во вращающуюся систему координат (рис. 4) [9].

Изначально параметры ротора были приведены к обмотке статора и осуществлено моделирование асинхронной машины с фазным ротором серии МТ-11-6. После сравнения полученных результатов с паспортными данными была установлена адекватность данной модели, что позволило в дальнейшем приступить к моделированию МДП. Для получения реальных значений токов и напряжений ротора (рис. 2) на входе блока преобразования координат $(\alpha, \beta, \gamma) \rightarrow (A, B, C)$ и на выходе блока $(A, B, C) \rightarrow (\alpha, \beta, \gamma)$ были установлены блоки усиления Gain со значениями коэффициента трансформации 2,649.

При создании опытного образца классической МДП обмотка статора двигателя МТ-11-6 была выполнена с меньшим числом витков; число витков ротора осталось неизменным. Однако при этом не удалось достичь равенства ЭДС статора и ротора. «Коэффициент трансформации» между старой и новой (с меньшим числом витков) обмотками статора составил 2,25. Для получения реальных токов и напряжений новой обмотки статора в блок DFIG были введены соответствующие блоки Gain с коэффициентами 2,25 (рис. 2).

В отличие от стандартного блока Asynchronous Machine в блоке DFIG доступны как начала, так и

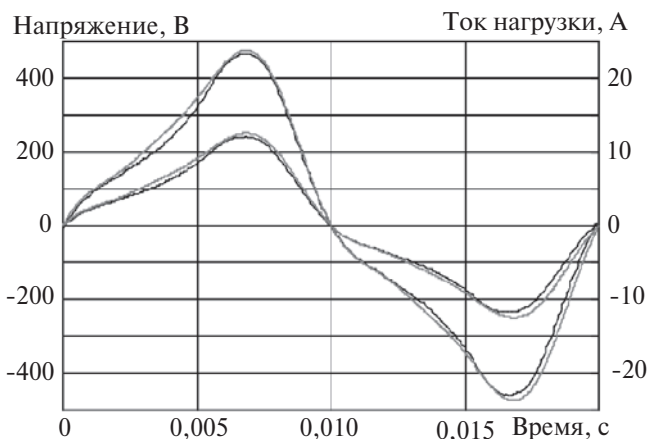


Рис. 5

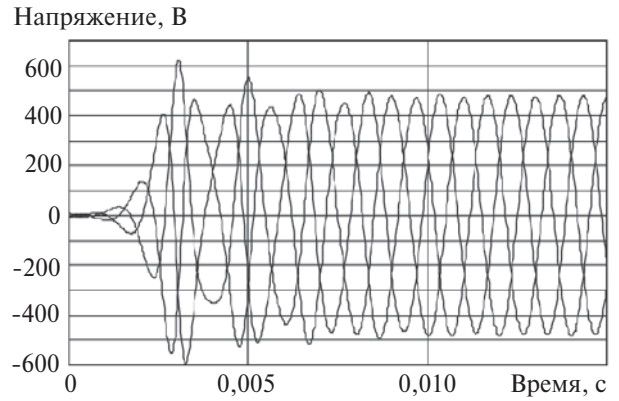


Рис. 6

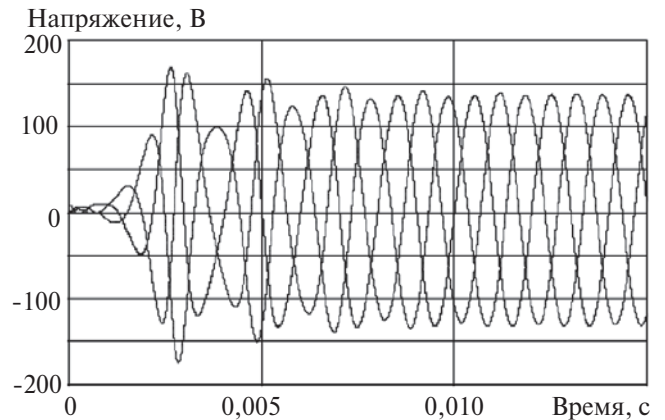


Рис. 7

концы обмоток статора и ротора. Это позволяет достаточно просто осуществлять различные соединения, в том числе и последовательное соединение обмоток МДП. Закоротив обмотку ротора, а обмотку статора соединив в звезду или треугольник, можно получить модель асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

При моделировании генератора использовались параметры асинхронной машины с фазным ротором серии МТ-11-6, параметры обмотки ротора которой были приведены к обмотке статора [10]. Емкость конденсаторов на фазу составляла $C_{\text{МДП}} = 135 \text{ мкФ}$.

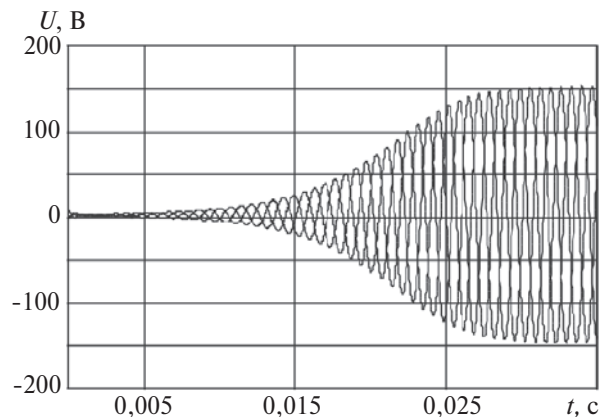


Рис. 8

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные кривые тока и напряжения, после подключения к двум фазам генератора активного сопротивления $r_{\text{нагр}} = 37,9$ Ом. Расхождение по напряжению составило 3,13%, а по току – 6,33%. Во время проведения экспериментальных исследований использовалась плата сбора данных PCI-6024E фирмы National Instruments.

Из рис. 5 видно, что при однофазной нагрузке происходит искажение кривых напряжения и тока, что может стать препятствием на пути использования генератора. Следует отметить, что при подключении симметричной трехфазной нагрузки искажения отсутствуют.

Определенный интерес представляет конденсаторное самовозбуждение МДП. Результаты расчета этого процесса при последовательном соединении обмоток статора и ротора МДП представлены на рис. 6, а при параллельном – на рис. 7. Для сравнительного анализа на рис. 8 показан процесс самовозбуждения асинхронного генератора (АГ) с теми же параметрами, что и у генератора на базе МДП. При моделировании АГ использовался блок DFIG. Обмотка ротора была замкнута накоротко, а обмотка статора соединена в звезду.

При сравнении особенностей самовозбуждения МДП и АГ в качестве постоянной величины была взята реактивная мощность, которая потребляется этими генераторами в установившемся режиме на холостом ходу, ее значение составило $Q = 4870$ ВА. Эта мощность потреблялась МДП при последовательном соединении обмоток и значении емкости конденсаторов возбуждения $C_{\text{МДП}} = 135$ мкФ. При параллельном соединении обмоток МДП и реализации АГ на основе блока DFIG происходит снижение напряжения, поэтому такое значение реактивной мощности удастся получить только за счет увеличения емкости конденсаторов возбуждения. В данном случае значение емкости на фазу $C_{\text{МДП}} = 573,2$ мкФ (параллельное соединение); $C_{\text{АГ}} = 465,8$ мкФ.

При моделировании самовозбуждения генераторов в качестве стартера (возмущающего фактора) принималась остаточная энергия на конденсаторе одной из фаз [11], принятая равной $W_{\text{СМДП}} = W_{\text{САГ}} = 0,005$ Дж. При известных значениях емкости и энергии остаточные напряжения на конденсаторах составили $U_{\text{СМДП}} = 8,6$ В, $U_{\text{СМДП}} = 4,2$ В (параллельное соединение) и $U_{\text{САГ}} = 4,7$ В. Все остальные начальные условия, включая условия в блоке DFIG, принимались равными нулю. Частота вращения ротора АГ составляла $\omega_{\text{рАГ}} = \omega_{\text{рМДП}} / 2 = 314,159$ рад/с, где $\omega_{\text{рМДП}} = 2 \times 314,159$ рад/с – частота вращения генератора на базе МДП.

Представленные на рис. 6–8 результаты свидетельствуют о том, что кривые напряжения при самовозбуждении МДП в отличие от АГ имеют апериодические составляющие, а сам процесс протекает более интенсивно.

П р и л о ж е н и е .

```
% Файл: DFIG_s_func_m.m
function[sys,x0,str,ts] =
DFIG_s_func_m(t,x,u,flag)
global r_1 r_2 L_1 L_2 p J_ad Tok M;
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes();
case 1,
sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 3,
sys=mdlOutputs(t,x,u);
case { 2, 4, 9 },
sys = [ ];
otherwise
error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end

function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes()
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 6;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 7;
sizes.NumInputs = 7;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0 0 0 0 0 0]; str = [ ]; ts = [0 0];
global r_1 r_2 L_1 L_2 p J_ad Tok M;
Tok = [0,0,0, 0,0,0]; M = 0;
% Параметры ротора АД серии МТ-11-6
% приведены к обмотке статора
r_1 = 3.67; r_2 = 4.28;
L_1 = 0.00786; L_2 = 0.01251;
p = 3; J_ad = 0.0425;
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
global r_1 r_2 L_1 L_2 p J_ad Tok M;
% Намагничивающий ток
i_m_alfa = (2/3)*( (Tok(1)+Tok(4))- ...
0.5*( (Tok(2)+Tok(5)) + (Tok(3)+Tok(6)) ));
i_m_beta = ((Tok(2)+Tok(5)) - ...
(Tok(3)+Tok(6)))/sqrt(3);
i_m = sqrt( i_m_alfa^2 + i_m_beta^2);
% Взаимная индуктивность. Формула Фрелиха
M = (2/3)*(1./(3.3631 + 0.6247*i_m)); mm =
M/2;
% Матрица индуктивностей
LL = ...
```

```

[L_1+M -mm -mm M -mm -mm ;
-mm L_1+M -mm -mm M -mm ;
-mm -mm L_1+M -mm -mm M ;
M -mm -mm L_2+M -mm -mm ;
-mm M -mm -mm L_2+M -mm ;
-mm -mm M -mm -mm
L_2+M];
% Расчет токов
Tok = LL\x(1:6) ;
% Система дифференциальных уравнений
bb(1)= u(2) -r_1*Tok(1);
bb(2)= u(3) -r_1*Tok(2);
bb(3)= u(4) -r_1*Tok(3);
bb(4)= u(5) -r_2*Tok(4) -(x(5)-x(6))*u(1)/sqrt(3);
bb(5)= u(6) -r_2*Tok(5) -(x(6)-x(4))*u(1)/sqrt(3);
bb(6)= u(7) -r_2*Tok(6) -(x(4)-x(5))*u(1)/sqrt(3);
sys = bb;
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global r_1 r_2 L_1 L_2 p J_ad Tok M;
sys = [Tok(1) Tok(2) Tok(3) Tok(4)...
Tok(5) Tok(6) M ];

```

Выводы. 1. Созданный электротехнический блок DFIG, реализованный в MatLab и его пакетах расширения Simulink и SimPowerSystems, может быть использован для исследования асинхронного генератора с конденсаторным самовозбуждением, а также классической машины двойного питания при её работе в генераторном режиме с конденсаторным самовозбуждением как при последовательном, так и при параллельном соединении обмоток статора и фазного ротора.

2. При подключении однофазной нагрузки к МДП с конденсаторным самовозбуждением кривая напряжения сильно искажается, что необходимо учитывать при разработке автономных электротехнических комплексов и систем.

3. При конденсаторном самовозбуждении в кривых напряжения МДП имеются апериодические составляющие, а процесс самовозбуждения протекает более интенсивно, чем у асинхронного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Моделирование и исследование режимов работы синхронных генераторов ветроэлек-

трических установок при частотном управлении. — Электричество, 2010, № 7.

2. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. Kundu P., Tandon A.K. Capacitor self-excited double-armature synchronous generator for enhanced power output — Collect. Techn. Pap. Pt. 3 of 29 th Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf., Monterey (Calif.), 7—11 Aug., 1994: Washington (D.C.), 1994.

4. Джэндубаев А.-З.Р. Исследование автономного асинхронного генератора с конденсаторным самовозбуждением и параллельным соединением обмоток статора и фазного ротора. — Электричество, 2005, № 12.

5. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.

6. Черных И.В. Simulink: инструмент моделирования динамических систем. URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>

7. Амбарцумова Т.Т., Ле Куанг Кыонг. Макромоделирование многоконтурных асинхронных двигателей в среде MatLab-Simulink. — Изв. вузов. Электромеханика, 2012, № 1.

8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2001.

9. Глазенко Т.А., Хрисанов В.И. Полупроводниковые системы импульсного асинхронного электропривода малой мощности. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.

10. Вешневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. — М.: Энергия, 1977.

11. Джэндубаев А.-З.Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч. 1. Общие вопросы. Генератор постоянного тока. — Электричество, 2006, № 11.

[09.01.13]

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

Баракхоев Рашид Юнусович окончил в 2008 г. Институт строительства и электроэнергетики СевКавГГТА. Аспирант кафедры электроснабжения СевКавГГТА.

Джэндубаев Зураб Абрек-Заурович студент института электротехники Московского энергетического института.