

УДК 621.314.263

М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, А. А. Бажанова, Ф. Г. Келеш
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Экспериментальные исследования системы с асинхронизированным генератором-двигателем и каскадным преобразователем частоты

На макете системы с асинхронизированным генератором-двигателем и каскадным преобразователем частоты отработаны алгоритмы векторного управления активным выпрямителем, инвертором и генератором-двигателем. Алгоритмы построены при использовании датчика частоты вращения ротора с компенсацией колебаний в звеньях выпрямленных напряжений преобразователя сигналами по мощности фаз ротора. Описан способ обеспечения симметрии токов ротора при несимметричной силовой схеме преобразователя. Приведены результаты исследований на компьютерной модели системы.

Асинхронизированный генератор-двигатель, преобразователь частоты, активный выпрямитель, автономный инвертор напряжения, векторное управление, макет, модель, эксперимент

Комплекты электрооборудования с асинхронизированными генераторами-двигателями (АГД) используются в гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС) [1]–[4], в качестве компенсаторов мощности [5], [6], накопителей энергии (НКЭ) [7], в ветроэлектрических установках, в приливных электростанциях, для связи энергосистем [8], в интеллектуальных энергосистемах [9], [10]. Основное преимущество АГД заключается в том, что они обеспечивают частотное регулирование параметров при использовании преобразователей частоты (ПЧ) сравнительно небольшой мощности.

АГД выполняются обычно с трехфазными обмотками ротора и ПЧ подключаются к ним через контактные кольца. Частота вращения АГД регулируется с помощью ПЧ. В установившихся режимах работы системы в зависимости от знака

скольжения активные мощности на валу (P_J), статора (P_s) и ротора (P_r) распределяются в соответствии с рис. 1.

Скольжение и активные мощности АГД:

$$s = (n_s - n) / n_s, \quad P_r = P_s s, \quad P_J = P_s (1 - s),$$

где n и n_s – фактическая и синхронная частоты вращения ротора АГД; s – скольжение.

Структура ПЧ, параметры, алгоритмы управления зависят от назначения системы с АГД, мощности, зон регулирования и др. Для исследования таких комплексов в ПАО «Силовые машины» созданы макет, а также компьютерные модели [8], [11]–[14]. В разработке системы и в исследованиях участвовали А. Н. Большаков, Н. А. Серов, Д. М. Воробьев и другие сотрудники ПАО «Си-

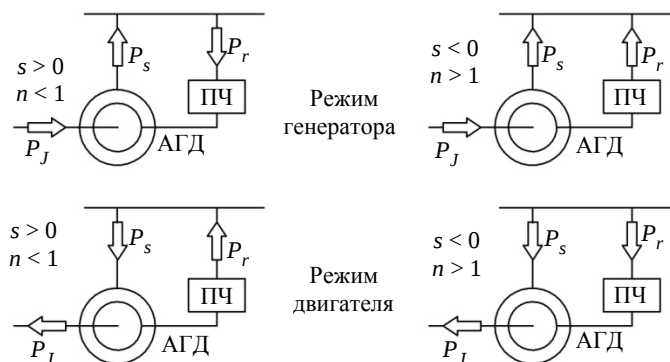


Рис. 1

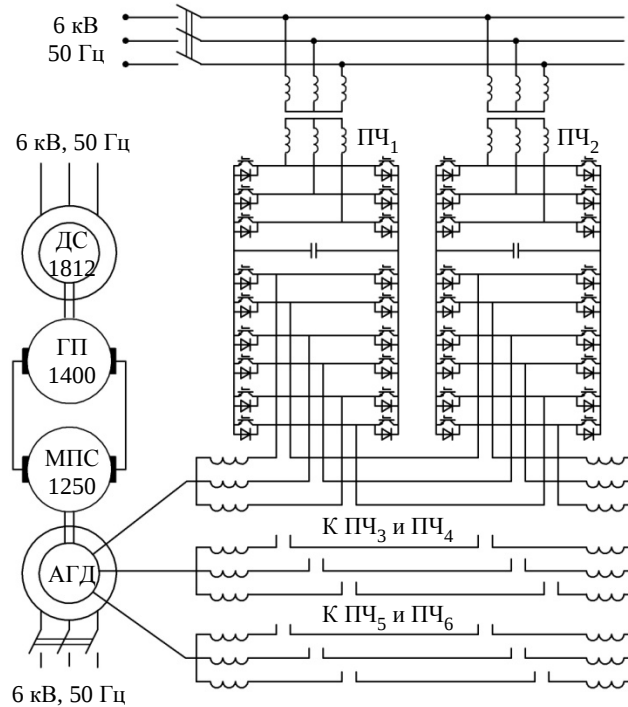


Рис. 2

ловые машины». В данной публикации приведены результаты работы.

Макет системы с АГД и каскадным ПЧ. Макет создан по схеме на рис. 2. ПЧ выполнен по каскадной схеме с целью его использования еще и в системах электропривода. На рис. 3 приведена фотография АГД макета.

Макет питается от сети 6 кВ, 50 Гц. ПЧ содержит 6 трехфазно-однофазных преобразователей (ПЧ₁–ПЧ₆), каждый из которых подключен с одной стороны через трансформатор к сети 6 кВ, с другой – к фазе ротора АГД. В цепи питания каждой фазы ротора последовательно включены два трехфазно-однофазных ПЧ. К валу АГД подключена приводная машина постоянного тока (МПС-1250). Через эту и ряд других электрических машин происходит обмен мощностью между валом АГД и сетью 6 кВ.

Предусмотрены возможности изменения структуры макета. Например, возможна работа системы при исключении из схемы ПЧ₆ (или ПЧ₂, ПЧ₄ и ПЧ₆). В табл. 1 приведены основные параметры АГД (разработчик А. Н. Большаков).



Рис. 3

Таблица 1

Полная мощность АГД, кВ · А	2530
Активная мощность, кВт	2400
Линейное напряжение, В	6300
Частота вращения, об/мин	300
Ток возбуждения холостого хода, А	835
Напряжение возбуждения холостого хода, В	15
Амплитуда напряжения фазы ротора при $s = 0$, В	20
Амплитуда тока фазы ротора при $s = 0$, А	1350
Амплитуда напряжения фазы ротора при $s = 40 \%$, В	1220
Амплитуда тока фазы ротора при $s = 40 \%$, А	1350

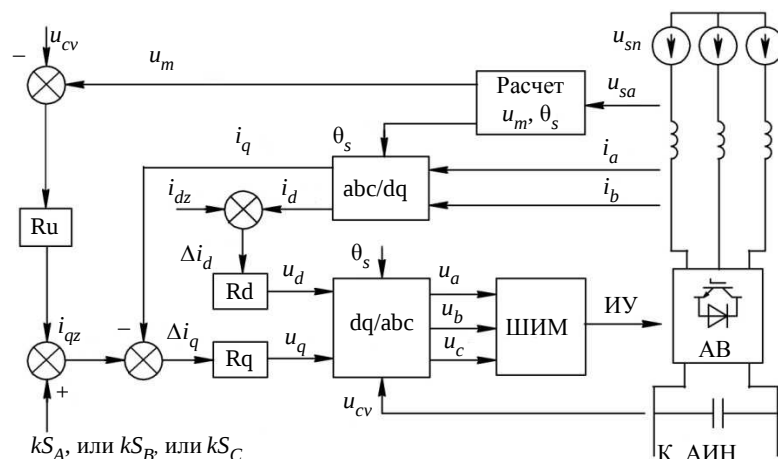


Рис. 4

Векторное управление АВ. Активные выпрямители (АВ) в ПЧ решают следующие задачи: стабилизация выпрямленного напряжения на заданном уровне, формирование синусоидальных токов сети, поддержание заданного коэффициента мощности сети, передача энергии из сети в ротор и обратно (в зависимости от режима работы АГД). Перечисленные задачи решаются системой управления (СУ) АВ в одной фазе ротора, изображенной на рис. 4 (разработчик Н. А. Серов).

СУ работает с дискретностью, соответствующей частоте ШИМ 4 кГц. На каждом периоде ШИМ (250 мкс) осуществляются измерения напряжений (u_a , u_b) и токов (i_a , i_b) фаз сети, напряжения конденсатора (u_{cv}) на выходе АВ. На каждом периоде ШИМ указанные параметры усредняются по нескольким измерениям.

СУ – векторная. В ней переменные регулируются в осях dq . Ось d совпадает с вектором напряжения и по ней направляется проекция вектора тока, соответствующая реактивной мощности. Ось q перпендикулярна оси d и по ней направляется проекция вектора тока, соответствующая активной мощности.

Напряжения фаз u_a и u_b используются для расчета текущих амплитуды и фазы θ_s напряжения сети. Амплитуда напряжения (~537 В), увеличенная до 800 В (u_m), служит заданием для регулятора Ru, поддерживающего напряжение конденсатора. Указанное задание сравнивается с измеренным напряжением конденсатора u_{cv} и рассогласование поступает на вход ПИ-регулятора. На выходе регулятора формируется заданная проекция тока i_{qz} – с учетом мощности данной фазы ротора kS_A , или kS_B , или kS_C , k – коэффициент (возможно построение СУ без использования сигнала по мощности [15] при увеличении пульсаций напряжений конденсаторов ПЧ).

По оси q поддержание тока осуществляется ПИ-регулятором Rq. На входы этого регулятора поступают сигналы по заданной проекции тока i_{qz} и по фактической проекции i_q . На выходе регулятора формируется проекция напряжения управления u_q .

По оси d ток поддерживается ПИ-регулятором Rd. На его входы поступают сигналы по заданному нулевому значению проекции тока i_{dz} (соответствует $\cos \varphi = 1$) и по фактической проекции i_d . На выходе регулятора формируется проекция напряжения управления u_d .

При переходах от осей фаз к осям dq и обратно используются преобразования токов и напряжений Парка и Кларка (рис. 4). Проекция напряжений на оси dq формируются в физических единицах. При их преобразовании к осям фаз осуществляется масштабирование с учетом выпрямленного напряжения.

Рассмотренная структура векторного управления АВ в макете близка к СУ экскаваторов, описанных в известных публикациях [16].

Векторное управление АИН и АГД. В макете частота вращения ротора задается в СУ АИН. Активная мощность нагрузки регулируется машиной постоянного тока. СУ АИН и АГД векторная. Ее схема представлена на рис. 5 (разработчик Н. А. Серов).

На входы СУ поступают сигналы по входному напряжению u_{cv} (на конденсаторах АВ), по токам фаз ротора i_a , i_b , по частоте вращения ротора, по фазе напряжений сети θ_s . Обработка сигнала датчика частоты вращения позволяет выделить частоту вращения ω и угол поворота ротора θ_r .

В СУ определяется разница сигналов θ_s и θ_r , которая рассматривается как угол поворота оси d .

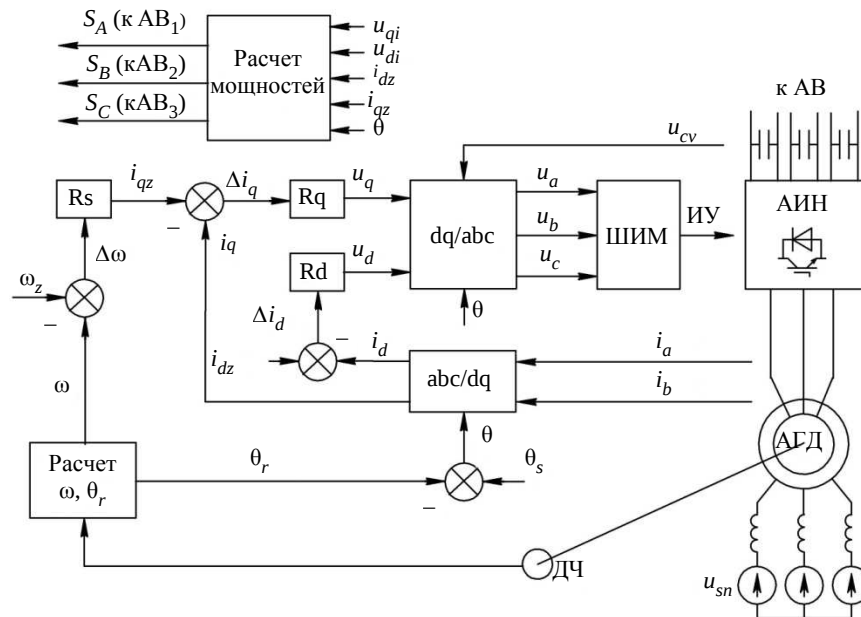


Рис. 5

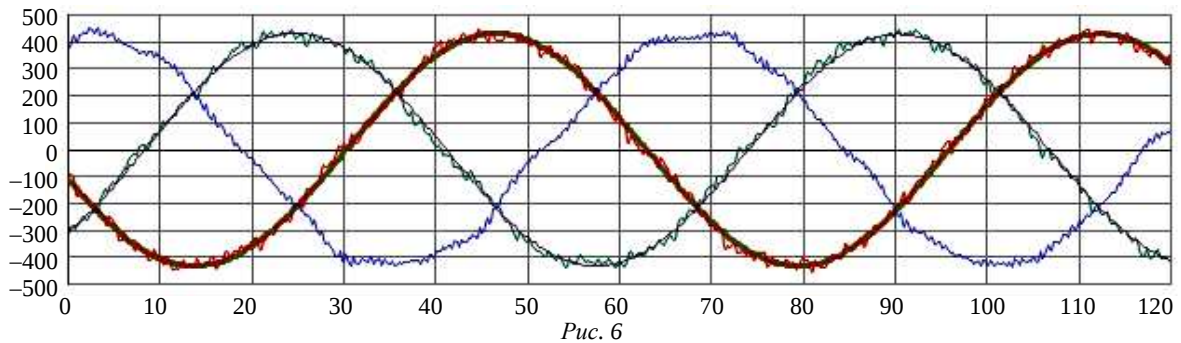


Рис. 6

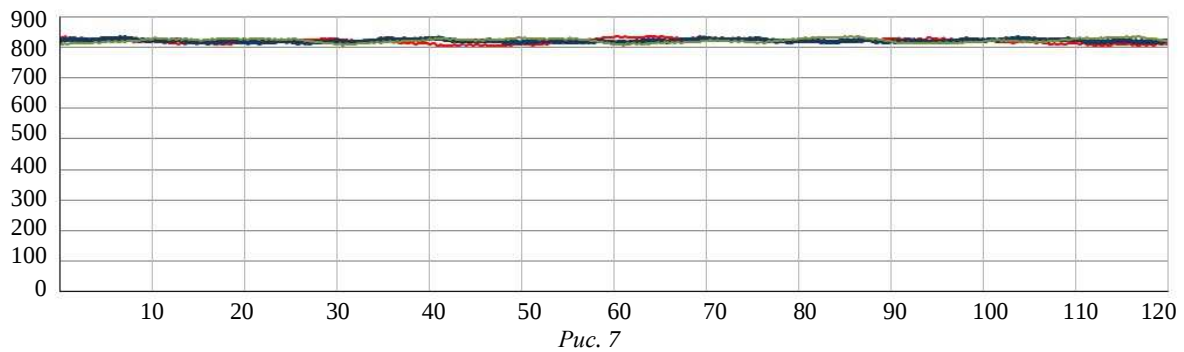


Рис. 7

ротора θ . Этот угол позволяет разложить измеренные токи фаз ротора i_a, i_b, i_c на проекции i_d, i_q .

В контуре регулирования частоты вращения действует ПИ-регулятор R_s . На его входы поступают сигналы по заданной частоте ω_z и фактической частоте ω . На выходе регулятора формируется заданная проекция тока i_{qz} .

По оси d задается проекция тока i_{dz} . Ее задание определяет реактивную мощность статора АГД.

Для поддержания заданных токов по осям d и q используются ПИ-регуляторы R_d и R_q . На их выходах формируются проекции напряжений u_d и u_q по соответствующим осям в физических единицах. Эти

проекции преобразуются к осям фаз и масштабируются с учетом входного напряжения АИН. В результате в блок ШИМ подаются сигналы u_a, u_b, u_c .

Кроме указанного, в СУ вычисляются мгновенные значения полной мощности каждой фазы S_A, S_B, S_C . Сигналы по мощностям передаются в СУ соответствующих выпрямителей.

Эксперименты при работе макета в симметричных режимах. Часть экспериментов на макете выполнена при работе ПЧ₁, ПЧ₃, ПЧ₅ и исключении из работы ПЧ₂, ПЧ₄, ПЧ₆. В этом варианте системы диапазон регулирования скольжения АГД до 30 %.

На рис. 6–10 представлены диаграммы напряжений и токов, полученные при работе АГД в режиме двигателя при скольжении 30 % и активной мощности статора 1301 кВт. На рисунках токи указаны в амперах, напряжения – в вольтах, фаза – в градусах, время – в миллисекундах.

Как видно из рис. 6, заданные и фактические токи фаз ротора практически совпадают, что свидетельствует о достаточно точной работе СУ АГД. СУ АВ также достаточно точно выполняют основные задачи. Выпрямленные напряжения AB_1 , AB_2 , AB_3 поддерживаются на уровне порядка 800 В практически без пульсаций (рис. 7).

Особенностью процессов в рассматриваемой системе является форма токов фаз АВ (рис. 8). В них проявляются биения с удвоенной частотой

токов ротора АГД. При пофазном сложении токов фаз AB_1 , AB_2 , AB_3 и приведении их к первичной обмотке трансформатора определяются токи сети 6 кВ (рис. 9). В токах сети биения практически отсутствуют. В этом режиме активная мощность обмотки ротора через ПЧ передается в электро-сеть. По этой причине ток 1-й фазы AB_1 (рис. 9) сдвинут относительно напряжения 1-й фазы сети (рис. 10) приблизительно на угол π .

На рис. 11 представлена схема распределения активных мощностей между устройствами макета. Сумма указанных активных мощностей должна быть равна 0, если не учитывать потери энергии. В реальной установке потери есть и небаланс мощностей, в данном случае определяемый выражением

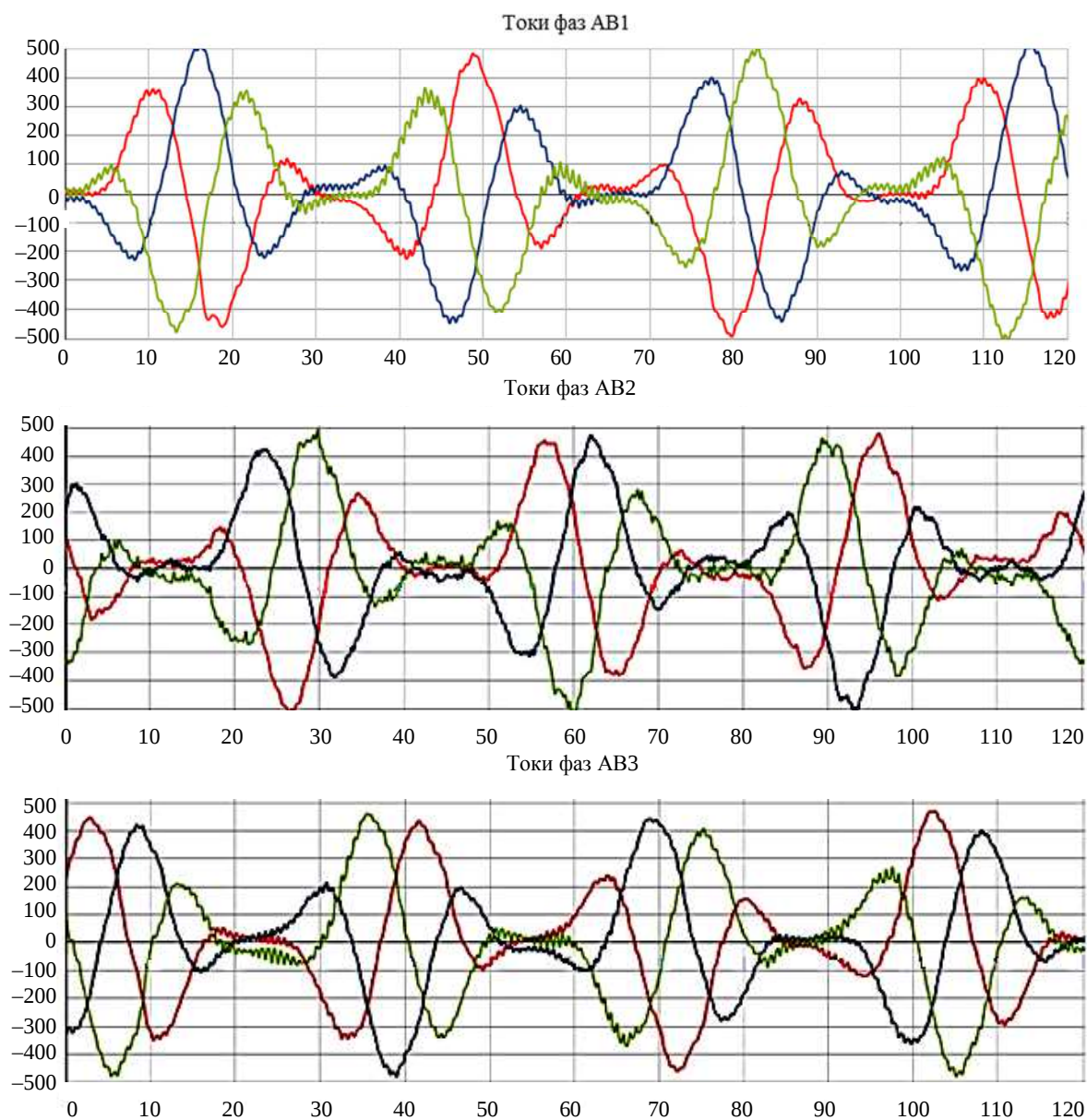
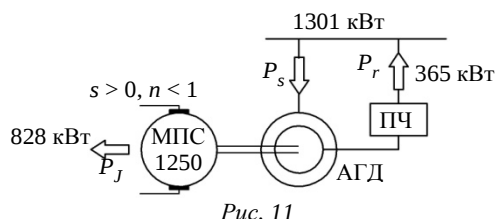
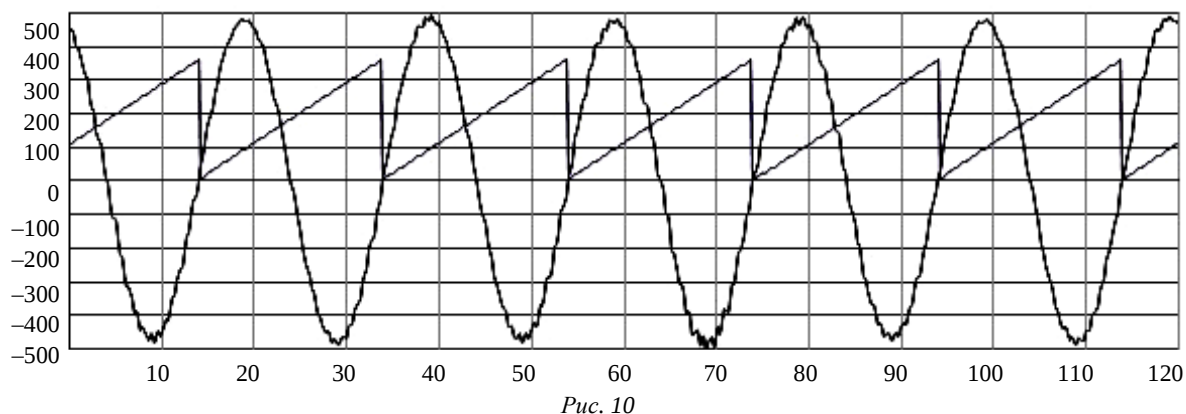
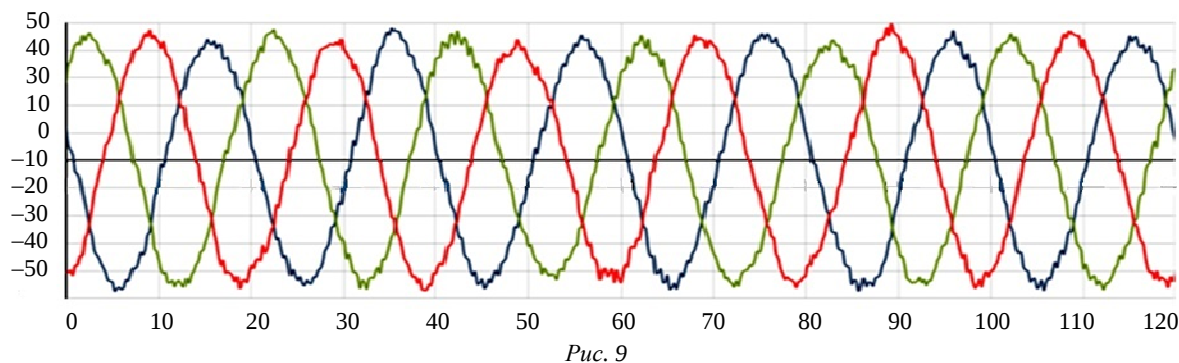


Рис. 8



$$\Delta P = P_s - P_r - P_J = 1301 - 365 - 828 = 108 \text{ кВт.}$$

Небаланс мощности 108 кВт соответствует потерям энергии в АГД, в нагрузочной машине и в ПЧ, а также погрешностям измерений и вычислений.

Работа макета в несимметричных режимах.

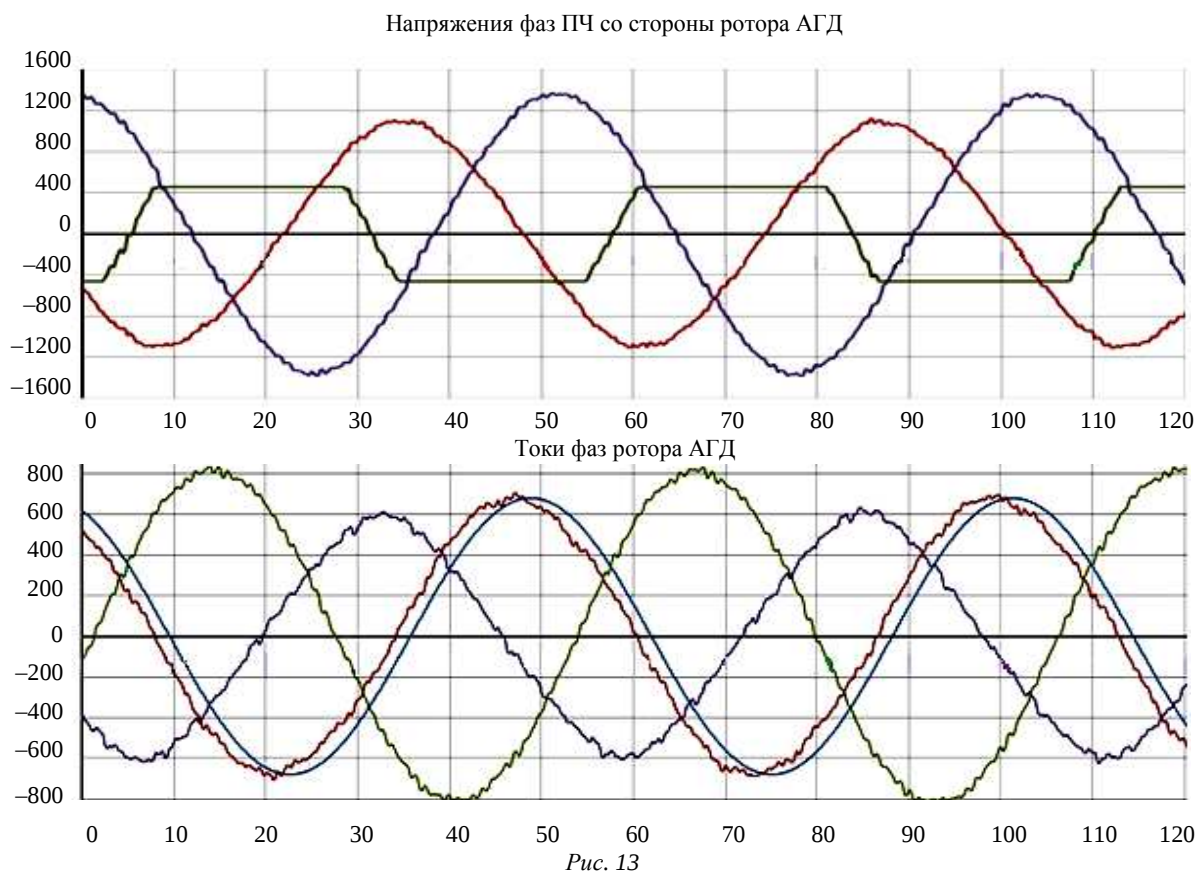
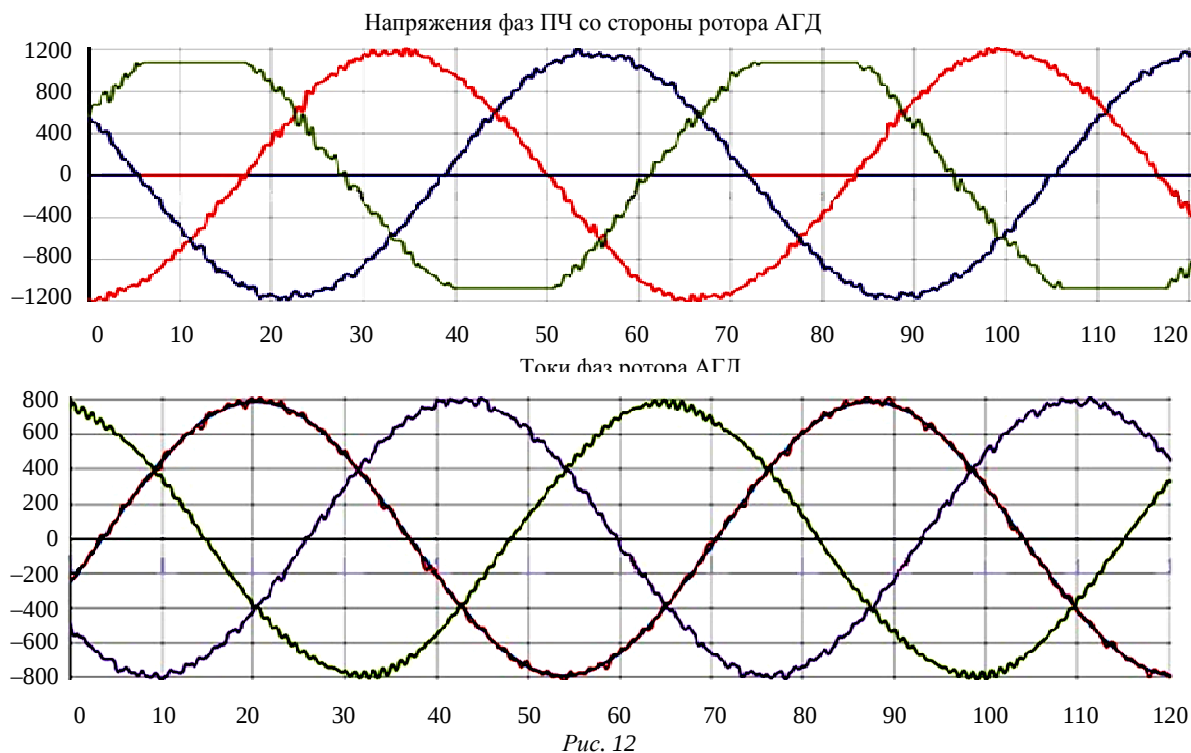
Часть экспериментов выполнена при использовании всех ячеек преобразования частоты ПЧ₁–ПЧ₆ (см. рис. 2), т. е. при высоковольтной схеме питания ротора, в которой при выпрямленном напряжении каждой ячейки более 800 В может быть достигнута амплитуда напряжения фазы ротора более 1600 В. Если из макета исключается ПЧ₆, то оставшиеся в работе ПЧ₁–ПЧ₅ образуют высоковольтную несимметричную схему питания обмотки ротора. Для этого режима на рис. 12 и 13 представлены диаграммы напряжений и токов фаз ротора при холостом ходе АГД и скольжениях 30 и 40 %.

На рисунках представлены трехфазные системы напряжений ПЧ со стороны ротора и токов ротора.

При скольжении АГД 30 % (рис. 12) в высоковольтных ветвях ПЧ перемодуляции нет и напряжения фаз ротора практически синусоидальны. В низковольтной ветви ПЧ АИН работают с небольшой перемодуляцией, верхние и нижние части синусоиды напряжения обрезаются. Токи фаз ротора сохраняют симметрию и соответствуют заданным кривым.

При увеличении скольжения АГД до 40 % (рис. 13) увеличиваются напряжения фаз ротора и их несимметрия возрастает, так как низковольтная фаза ПЧ не обеспечивает требуемое напряжение. Токи фаз ротора значительно отклоняются от заданных кривых. В данном эксперименте введено также искусственное ограничение напряжения низковольтной фазы ПЧ (на уровне 420 В) для усиления эффекта воздействия несимметрии ПЧ на электромагнитные процессы.

Восстановить симметрию токов ротора при больших значениях скольжения АГД можно, вводя в напряжения управления АИН и в напряжения фаз на выходе ПЧ составляющих нулевой последовательности (алгоритм управления предложен М. В. Прониным, реализован в макете Д. М. Воробьевым). Эти составляющие определяются в соответствии с рис. 14 как разница напряжений низковольтной фазы ПЧ без учета перемодуляции и с ее учетом. Далее из напряжений фаз, определенных без учета перемодуляции, вычитаются со-



ставляющие нулевой последовательности. В результате определяются напряжения фаз на выходе ПЧ, которые подаются на обмотку ротора. В этом случае описанная векторная СУ формирует сим-

метричную трехфазную систему токов фаз ротора, как указано на рис. 14.

Описанный алгоритм формирования напряжений ротора АГД предназначен для обеспечения

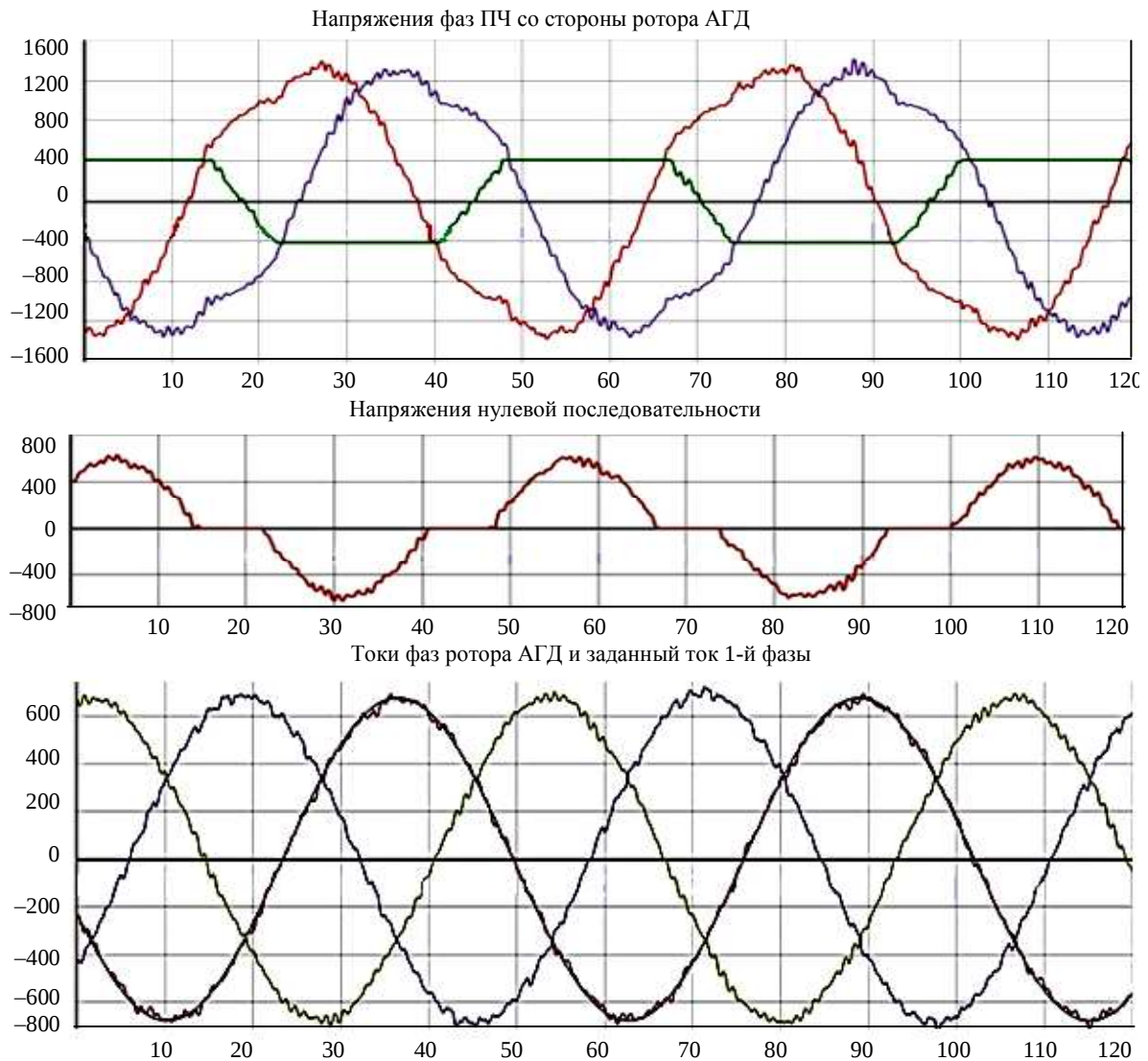


Рис. 14

симметрии трехфазной системы токов фаз ротора при широком диапазоне изменения скольжения ротора. Он выполняет указанную задачу при значительном увеличении напряжений ротора. Симметрия токов ротора обеспечивается также при существенном уменьшении влияния низковольтной фазы ПЧ на электромагнитные процессы, вплоть до исключения из работы преобразователя ПЧ₅ (см. рис. 2).

Как указано ранее, высоковольтные фазы рассматриваемого ПЧ могут обеспечить амплитуду фазного напряжения на выходе 1600 В при работе без перемодуляции АИН, т. е. значительные напряжения на выходе ПЧ могут быть сформированы только преобразователями ПЧ₁–ПЧ₄ (при исключении из работы преобразователей ПЧ₅ и ПЧ₆).

Исследования режимов работы АГД на компьютерной модели. Для анализа режимов работы АГД разработаны также математические и

компьютерные модели АГД и систем с АГД (математическое описание М. В. Пронина, программы расчета на ЭВМ А. Г. Воронцова). Расчеты и исследования на ЭВМ систем с АГД выполняли А. А. Бажанова и Ф. Г. Келеш.

Расчеты выполнены при следующих параметрах АГД: скольжении $s = 0, \pm 0.2, \pm 0.4$; $P_{ст} = 0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2$ МВт; $Q_{ст} = 0 \dots \pm 2$ Мвар.

В табл. 2 представлен результат расчета генераторного режима при скольжении $s = -0.4$, $P_{ст} = -2$ МВт.

Аналогичные расчеты выполнены также при других параметрах системы. На рис. 15 построены зависимости полной мощности статора от тока возбуждения при скольжении $s = 0, \pm 0.1, \pm 0.2$; активной мощности статора $P_{ст} = 0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2$ МВт и изменении реактивной мощности статора $Q_{ст} = 0 \dots \pm 2$ Мвар.

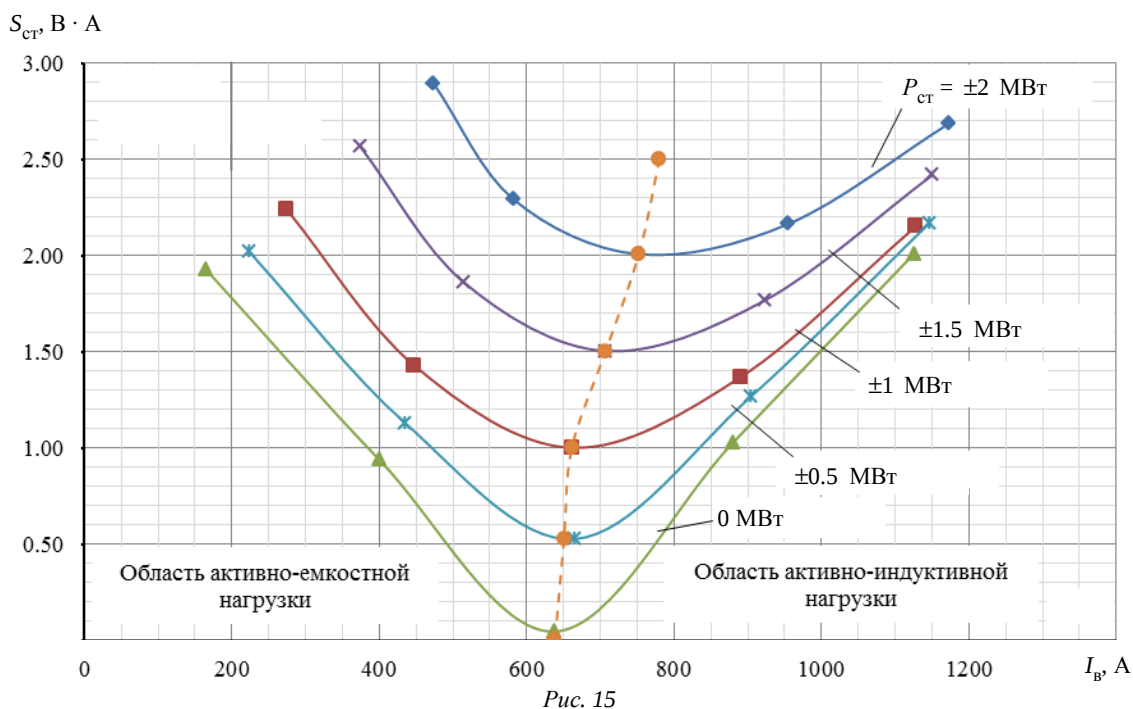


Рис. 15

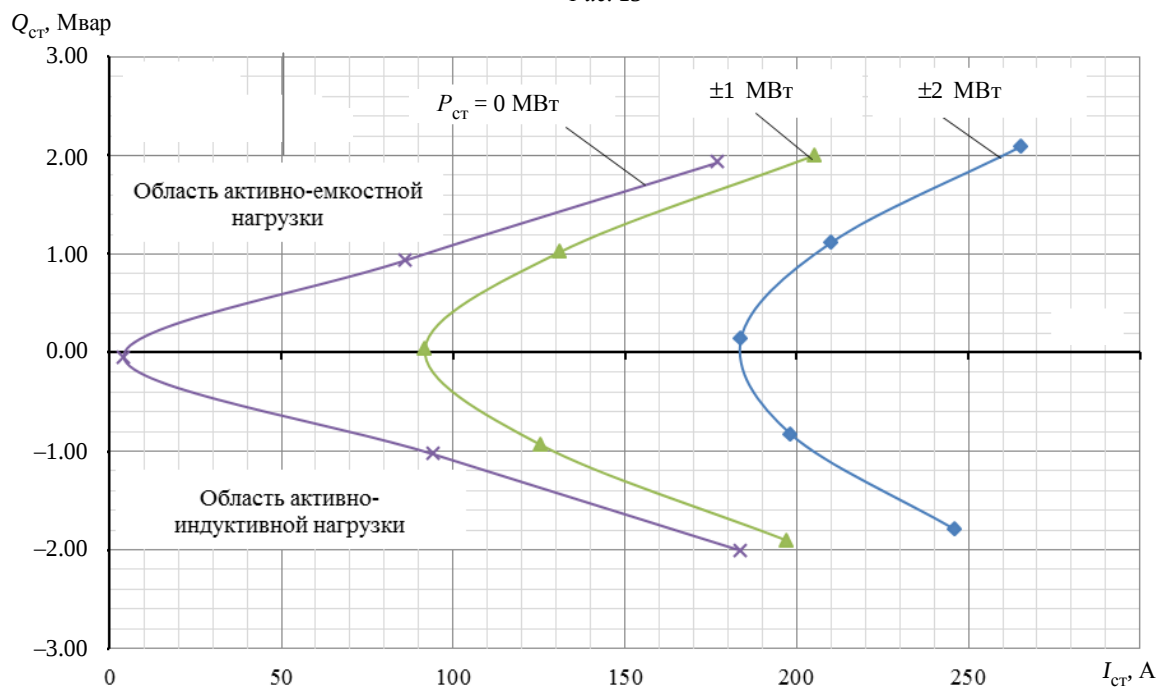


Рис. 16

Таблица 2

Напряжение 1-й фазы статора, В	3640.741
Ток 1-й фазы статора, А	246.175
Напряжение 1-й фазы ротора, В	873.685
Ток 1-й фазы ротора, А	1172.947
Электромагнитный момент АГД, %	-83.596
Частота вращения АГД, %	139.885
Активная мощность статора, МВт	-1.999
Активная мощность ротора, МВт	-0.751
Мощность на валу, МВт	-0.751
Реактивная мощность статора, Мвар	-1.794
Реактивная мощность ротора, Мвар	-2.978
Небаланс мощности, кВт	1.387

Если в нагрузке – активно-индуктивные сопротивления, то ток, протекающий в электрической машине, создает размагничивающее действие, которое уменьшает поток. Машина в сети должна иметь постоянное фиксированное напряжение, следовательно, требуется увеличение тока возбуждения (рис. 15).

Если имеется активно-емкостная нагрузка, то ток реакции якоря поворачивается относительно потока статора под другим углом и создает дополнительное намагничивание машины. Здесь номинальное напряжение машины обеспечивает-

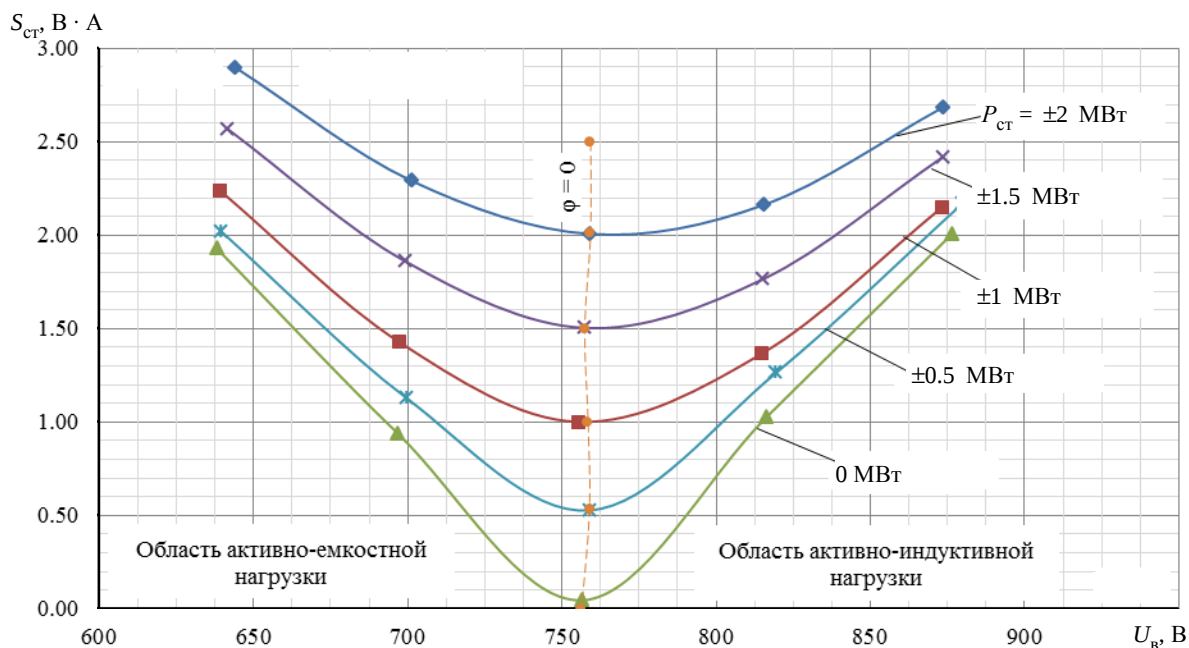


Рис. 17

ся при малых токах. Следовательно, чем меньше ток, тем больше активно-емкостная нагрузка.

Точка перехода от емкостной реактивной мощности к индуктивной располагается около 700 А. В этой точке реактивная мощность снижается до 0. Если в области активно-индуктивной нагрузки активная мощность складывается с индуктивной и за счет индуктивной мощности полная мощность растет, то в области активно-емкостной нагрузки активная мощность остается той же, следовательно, полная мощность растет за счет емкостной мощности.

На рис. 16 построены зависимости реактивной мощности статора от тока статора при скольжении $s = 0, \pm 0.1, \pm 0.2$, активной мощности статора $P_{ст} = 0, \pm 1, \pm 2$ МВт и изменении реактивной мощности статора $Q_{ст} = 0 \dots \pm 2$ Мвар.

При увеличении активной мощности статора растет ток статора. На рис. 17 построены зависимости полной мощности статора от напряжения возбуждения при скольжении $s = 0, \pm 0.1, \pm 0.2$; активной мощности статора $P_{ст} = 0, \pm 0.5, \pm 1, \pm 1.5, \pm 2$ МВт и изменении реактивной мощности статора $Q_{ст} = 0 \dots \pm 2$ Мвар.

Чем меньше напряжение возбуждения, тем больше активно-емкостная нагрузка.

Выводы:

1. Создан макет системы с асинхронизированным генератором-двигателем и каскадным

преобразователем. В нем реализовано векторное управление активными выпрямителями. При раздельном управлении активной и реактивной составляющими вектора тока сети активная составляющая корректируется по сигналу мгновенной мощности фазы ротора.

2. Для управления автономными инверторами и асинхронизированным генератором-двигателем использована структура векторного управления выпрямителя с изменениями – внешний контур регулирования выпрямленного напряжения выпрямителя заменен контуром регулирования скорости и частоты тока ротора. Для стабилизации скорости и определения положения оси d ротора использован сигнал датчика частоты вращения. Во внутренних контурах регулирования использованы регуляторы проекций вектора тока по взаимно-перпендикулярным осям.

Рассмотрены случаи работы каскадного преобразователя частоты в высоковольтном режиме – в одной из фаз нагрузки последовательно включены не все низковольтные ячейки преобразования частоты. Определен алгоритм управления преобразователем при несимметрии силовой схемы, позволяющий обеспечить симметрию трехфазной системы токов ротора. Он основан на введении в напряжения фаз составляющих нулевой последовательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bocquel A., Janning J. 4*300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // EPE 2003, Toulouse, France, Sept. 2003. P. 1–10.
2. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // EPE 05, Dresden, Germ., Sept. 2005. P. 1–10.
3. Benefits of variable speed pumped storage units in mixed Islanded power network during transient operation / C. Nicolet, Y. Pannatier, B. Kawkabani, A. Schwery, F. Avellan, J.-J. Simond // Proc. of HYDRO 2009. Lyon, France, 2009. P. 23.3.
4. Rich operation experiences and new technologies on adjustable speed pumped storage systems in Japan / K. Aguro, M. Kato, F. Kishita, T. Machino, K. Mukai, O. Nagura, S. Sekiguchi, T. Shiozaki // CIGRE 2008. Paris, France, 2008. P. A1-101.
5. Experience in operation of asynchronousized turbo-generators at power plants of Russia / Yu. G. Shakaryan, I. A. Labunets, P. V. Sokur, T. V. Plotnikova, I. Ya. Dovganyuk // Power Plants. 2009. № 10. P. 50–55.
6. Thyristor starters for ASK-100 asynchronousized compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technol. and Engin. 2011. Vol. 44, № 5. P. 411–415.
7. Pronin M. V., Vorontsov A. G., Kuzin M. E. Simulation and investigation of a kinetic energy storage as part of EPS // EPE'14 ECCE EUROPE, Lappeenranta, Finland, 26–28 Aug. 2014.
8. Electric and hydraulic process connection in hydraulic and pumped storage hydroelectric power stations / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev, M. E. Kuzin // IECON 2013, Vienna, Austria, 2013. P. 2031–2036.
9. Shakaryan Yu. G. Asynchronousized machines and technology controlled AC transmission (FACTS) / Elektrotehnika. 2010. № 2. P. 2–4.
10. Lokhmatov A. P., Mnev R. D., Sokur P. V. Application of flywheel asynchronousized condenser in power system // Power Plants. 2011. № 1. P. 48–50.
11. A Pumped Storage Power Plant with Double-Fed Induction Machine and Cascaded Frequency Converter / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev // EPE-2011. En. URL: <http://www.epe-association.org/epe/index.php?main=/epe/documents.php%3Fcurrent=2248>.
12. A Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter for Pumped Storage Power Plant Applications / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev, T. Nahdi // PEAM 2011, Wuhan, China.
13. Features of a Drive System for Pump-Storage Plant Applications based on the use of Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter / M. V. Pronin, O. B. Shonin, A. G. Vorontsov, G. A. Gogolev // EPE-PEMC 2012, 4–6 Sept., Novi Sad, Serbia. Novi Sad, 2012.
14. High-frequency parameters of double-fed machine and additional frequency converter power losses / G. A. Gogolev, V. S. Tretiakov, A. S. Vataev, Yu. P. Kos'kin, A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, V. Yu. Shelyukh // EPE'13. 3–5 Sept. 2013 Lille, France.
15. Single-phase Active Rectifiers in a Cascade Frequency Converter / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, T. Nahdi, I. A. Pimenova // 16th Mechatronika 2014, Dec. 3–5, Czech Republic, Brno.
16. Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, G. Gogolev // EPE-2011. En. URL: <http://www.epe-association.org/epe/index.php?main=/epe/documents.php%3Fcurrent=2248>.

M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, A. A. Bazhanova, F. G. Kelesh
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SYSTEM WITH ASYNCHRONIZED GENERATOR-MOTOR AND A CASCADE FREQUENCY CONVERTER

The layout of the system with asynchronousized generator-motor and a cascade frequency converter in the rotor circuit worked vector control algorithms for active rectifier, voltage inverter and generator-motor. The algorithms are constructed using the rotor speed sensor with compensation of fluctuations in the links of the rectified voltage signal converter for power rotor phases. Described a way of ensuring symmetry of the currents of a rotor with asymmetric power converter circuit. The results of research on a computer model of the system.

Asynchronous generator-motor, frequency converter, the active rectifier, autonomous voltage inverter, vector control, the layout, model, experiment