

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.313, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-85-93

Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации

Ю.Н. Булатов^{1 a}, А.В. Крюков^{2, 3 b}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Статья поступила 10.06.2016, принята 24.08.2016

С целью повышения гибкости и «живучести» электроэнергетических систем активно внедряются технологии распределенной генерации (РГ). Их применение позволяет стабилизировать напряжение в часы пиковых нагрузок, уменьшать потери в сетях и освободить пропускные способности связей. В системах электроснабжения железных дорог на основе установок РГ возможно улучшить качество электроэнергии и повысить энергоэффективность стационарной электроэнергетики. Однако при внедрении РГ в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, необходимо учитывать повышенные уровни несимметрии и гармонических искажений, вызванные однофазной и нелинейной тяговой нагрузкой. Эти факторы вызывают дополнительный нагрев генераторов установок РГ, что приводит к необходимости ограничения их нагрузки. В статье представлены результаты исследований на математической и физической моделях по влиянию несимметрии на работу генераторов, оснащенных автоматическими регуляторами возбуждения и частоты вращения. По результатам моделирования было выявлено, что при работе генератора на несимметричную нагрузку появляется заметный ток обратной последовательности, который может превысить предельно допустимый по условиям нагрева. Генератор начинает генерировать в сеть высшие гармоники, что приводит к дополнительным нагревам. Среднее значение тока возбуждения генератора, работающего на несимметричную нагрузку, практически не изменяется, но в обмотке возбуждения наводится ток частотой 100 Гц, амплитуда которого линейно возрастает при увеличении несимметрии. Поэтому ток возбуждения и нагрузку генератора необходимо ограничивать. Ограничение мощности генератора, работающего на несимметричную нагрузку, может быть определено по разности токов в фазах, которая не должна превышать 12 % от номинального тока.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; установки распределенной генерации; генераторы; несимметричная нагрузка; моделирование.

Influence of asymmetric load on turbine-generator sets in distributed generation plants

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2, 3 b}¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru

Received 10.06.2016, accepted 24.08.2016

In order to improve flexibility and durability of electrical power systems, distributed generation (DG) technologies are being actively introduced. By using them, it enables to stabilize voltage in peak hours, reduce losses in electrical grids and release transfer capacities of electrical couplings. In railroad power supply systems based on DG units it is possible to improve the quality of electrical power and improve the electrical efficiency of stationary electrical power industry. However, while introducing DGs in the electrical power grids, adjoining railroad substations, it is required to consider increased asymmetry and harmonic distortions caused by single-phase loads and non-linear draft load. These factors lead to additional heating of DG units, which determines the need to limit their loads. The article discusses the research results of the influence of asymmetry on the operation of generators with automatic field regulator and speed governor. The research results are based on mathematical and physical models. According to the modelling results, it has been found out that during the generator operation there emerges noticeable negative-sequence current on asymmetrical load. It may exceed the maximum current, allowed by the terms of heating. The generator starts producing higher harmonics in the grid, which leads to additional heating. The average generator exciter current value, operating on asymmetric load, does not virtually change, but in the excitation coil the current frequency is 100 Hz and its amplitude linearly rises as asymmetry increases. Therefore, excitation current and generator load are to be limited. The limit of generator power, operating on asymmetric load, can be determined based on the difference between the currents in phases, which must not exceed 12 % of the nominal current.

Key words: railroad power supply systems; distributed generation plants; generator sets; asymmetric load; modelling.

Введение

Для повышения гибкости и «живучести» электроэнергетических систем (ЭЭС) происходит переход от централизованной энергетики к объектам распределенной генерации (РГ). Данная концепция применима и к системам электроснабжения железных дорог (СЭЖД), основное назначение которых состоит в надежном обеспечении электроэнергией тяги поездов, а также нетяговых и нетранспортных потребителей. Применение в СЭЖД установок РГ позволит снизить финансовые затраты на энергообеспечение объектов инфраструктуры железных дорог, повысить надежность электроснабжения и улучшить качество электроэнергии в районах электроснабжения нетяговых потребителей [1–11]. Однако особенности режимов работы СЭЖД, связанные с резко переменным характером однофазных тяговых нагрузок, наличием несимметрии и гармонических искажений [12], усложняют условия работы синхронных генераторов (СГ) установок РГ. При наличии несимметрии по обмоткам статора генератора начинают протекать токи обратной последовательности, в результате чего образуется магнитный поток, вращающийся относительно ротора с двойной угловой скоростью. Этот магнитный поток пересекает обмотку ротора и индуцирует в ней токи двойной частоты, что приводит к возникновению дополнительных потерь. Кроме того, наличие обратного поля создает пульсирующий с частотой 100 Гц электромагнитный момент, вызывающий повышенные вибрации, а также появление гармонических искажений в напряжениях и токах статора и ротора. В результате возникает необходимость ограничивать величину отдаваемой генераторами мощности и допустимую продолжительность их работы в таких условиях. Причем незначительное увеличение несимметрии токов приводит к существенно уменьшению длительности работы генератора с номинальным током. Так, если при коэффициенте несимметрии токов 8 % генератор с номинальным током может работать длительно, то при несимметрии 12 % — только 10 мин, а при несимметрии 28 % — лишь 3 мин. В правилах технической эксплуатации (ПТЭ) электрических станций и сетей [13] также отмечается, что для генераторов допускается длительная работа с разностью токов в фазах, не превышающей 12 % от номинального.

Появление высших гармоник напряжения и тока в обмотках статора и ротора генератора в результате несимметричной нагрузки приводит к снижению коэффициента мощности. Таким образом, может произойти некоторое возрастание величины тока возбуждения. В работе [14] приводится следующая зависимость продолжительности работы генератора от величины тока возбуждения:

$$t = \frac{150}{|I_f^2 - 1|}, \quad (1)$$

где t — продолжительность работы генератора, с; I_f — ток возбуждения, о. е.

Данная зависимость (рис. 1) позволяет определить допустимое время работы генератора при перегрузке

по току возбуждения, ограниченное нагревом обмотки и возникающими дополнительными потерями. Из выражения (1) и рис. 1 видно, что при номинальном токе возбуждения генератор может работать длительное (неограниченное) время, а при превышении тока возбуждения всего на 5 % — 25 минут.

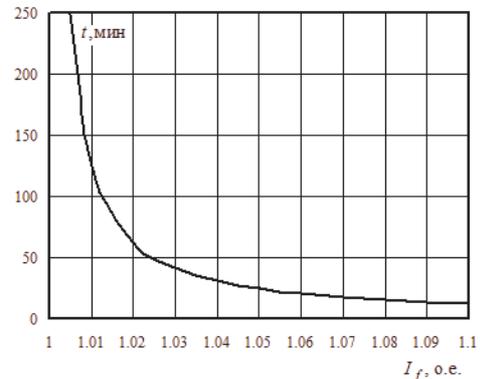


Рис. 1. Зависимость допустимой продолжительности работы генератора от величины тока возбуждения

Кроме того, в работе [14] получены зависимости длительно допустимой нагрузки синхронных генераторов от уровня несимметрии и величины гармонических искажений. Графики, иллюстрирующие такие зависимости, приведены на рис. 2. Следует отметить, что исследования режимов работы генераторов в СЭЖД, результаты которых представлены в работе [14], выполнены в 60-х гг. прошлого века. Тем не менее, общий принцип использования генераторов в СЭЖД, сформулированный в [14] и заключающийся в ограничении длительно допустимой нагрузки СГ при наличии несимметрии и гармонических искажений, применим и в современных условиях.

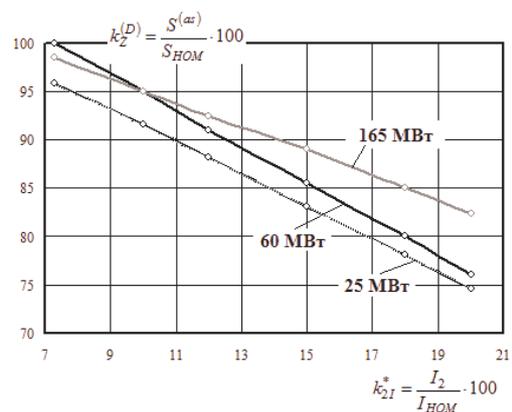


Рис. 2. Зависимости длительно допустимых коэффициентов загрузки от коэффициента несимметрии токов при $k_I = 5\%$

Однако изменения, которые произошли в ЭЭС и СЭЖД за более чем полувековой период, требуют проведения дополнительных исследований для уточнения рекомендаций по эффективному использованию СГ при наличии несимметрии и несинусоидальности. Особенно значительный прогресс за эти годы достигнут в части создания эффективных средств автоматического регулирования возбуждения и частоты вращения ротора СГ. В данной статье представлены результаты исследований

на математической и физической моделях по влиянию несимметрии на работу синхронных генераторов малой мощности, оснащенных автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ).

Описание математической модели и результатов исследования. Схема исследуемой имитационной модели, реализованной с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB, представлена на рис. 3. Генератор установки ПГ (Synchronous Machine), параметры которого приведены в табл. 1, моделируется высоковольтной синхронной машиной, приводимой во вращение паровой турбиной (Steam turbine), математи-

ческая модель которой характеризуется следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{P_T}{\mu} = \frac{1}{T_T s + 1},$$

где P_T — мощность турбины; μ — открытие регулирующего органа; T_T — постоянная времени турбины, определяемая запаздыванием в преобразовании энергии пара в механическую энергию (в среднем T_T составляет 0,2 с); s — оператор Лапласа.

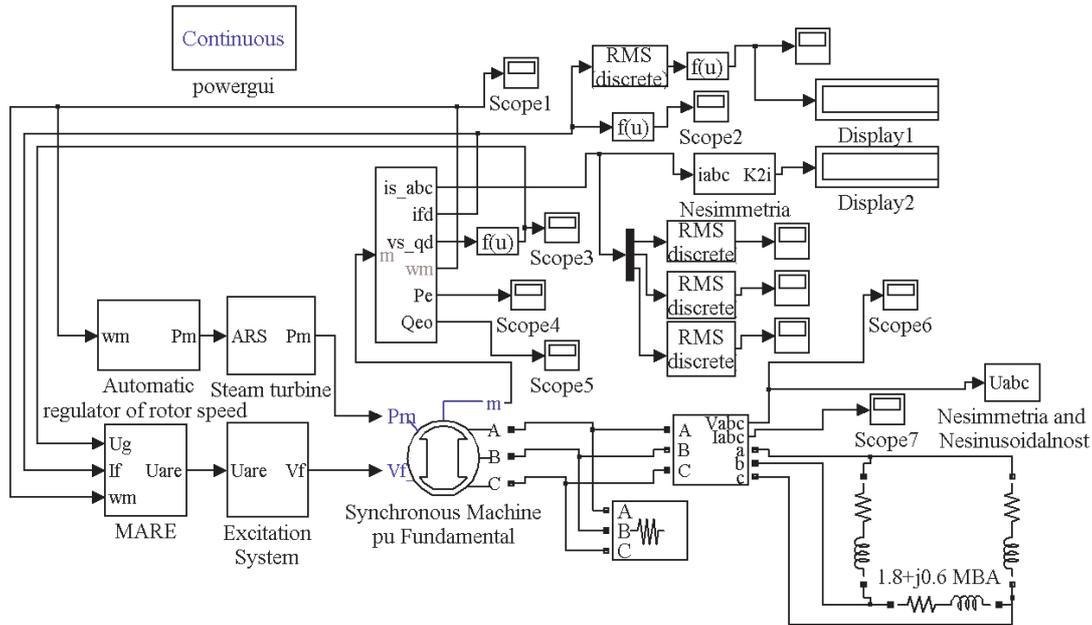


Рис. 3. Схема модели генератора, работающего на несимметричную нагрузку, в MATLAB

Таблица 1

Параметры синхронного генератора СГС-14-1-100-6У

Параметр	Единица измерения	Величина
Полная мощность генератора $S_{НОМ}$	кВ·А	3 125
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	—	0,8
Номинальное напряжение $U_{НОМ}$	В	6 300
Частота f	Гц	50
Синхронная скорость	об/мин	1 000
Активное сопротивление статора R_s	о. е.	0,00901
Индуктивность рассеяния статора L_f	о. е.	0,045
Индуктивность статора по продольной оси L_{md}	о. е.	2,43
Индуктивность статора по поперечной оси L_{mq}	о. е.	1,69
Сопротивление обмотки возбуждения R_f	о. е.	0,0021
Индуктивность обмотки возбуждения ротора L_{fd}	о. е.	0,506
Сопротивление демпферной обмотки по продольной оси R_{kd}'	о. е.	0,2998
Индуктивность демпферной обмотки по продольной оси L_{kd}'	о. е.	3,742
Сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси R_{kq1}	о. е.	0,0254
Индуктивность демпферной обмотки по поперечной оси L_{kq1}'	о. е.	0,2388
Постоянная инерции H	с	2,279
Коэффициент трения F	о. е.	0,009
Число пар полюсов p	—	3

Модель тиристорной системы возбуждения (Excitation System) (рис. 4) была сформирована на основе уравнений, описывающих тиристорный преобразователь и входной усилитель [15]. Для последнего можно принять допущение о линейной характеристике с коэффициентом усиления k_a и постоянной времени T_a . Тиристорный возбудитель моделируется аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения (*Limit*). При моделировании принимались следующие числовые значения параметров системы возбуждения: $k_a = 1$; $T_a = 0,001$; $k_e = 1$; $T_e = 0,025$.

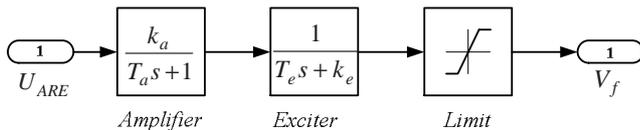


Рис. 4. Структурная схема модели тиристорной системы возбуждения в MATLAB: U_{ARE} — сигнал, поступающий от АРВ; V_f — сигнал, поступающий на обмотку возбуждения генератора; *Amplifier* — усилитель; *Exciter* — тиристорный возбудитель; *Limit* — блок ограничения напряжения

Для регулирования частоты и напряжения генераторов используются модели микропроцессорного АРВ (MARE) и АРЧВ (Automatic regulator of rotor speed), описание которых приведено в [16–18]. Согласование настроек АРВ и АРЧВ генераторов установки РГ осуществлялось с помощью программного комплекса «Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций» [19; 20].

Измерения несинусоидальности и несимметрии выполнялись с помощью стандартных блоков пакета SymPowerSystems системы MATLAB: Total Harmonic Distortion и 3-phase Sequence Analyzer.

Генератор в модели работал на активно-индуктивную нагрузку мощностью $1,8 + j0,6$ МВ·А. Несимметрия токов и напряжений вводилась путем увеличения мощности нагрузки между фазами a и b . При этом мощность нагрузки между фазами b , c и c , a уменьшалась на соответствующую величину для сохранения суммарной мощности. Результаты компьютерного моделирования, корреспондирующие с данными, полученными в [14], сведены в табл. 2 и проиллюстрированы рис. 5, 6.

Необходимо отметить, что среднее значение тока возбуждения генератора, работающего на несимметричную нагрузку, практически не изменяется. Однако в результате несимметрии в обмотке возбуждения наводятся токи частотой 100 Гц (рис. 5б), а амплитуда вынужденных колебаний тока в обмотке возбуждения линейно возрастает (рис. 6б).

Таким образом, рост коэффициента несимметрии токов k_{2I} сопровождается увеличением токов в отдельных фазах, уровня несимметрии напряжений на зажимах СГ, а также появлением гармонических искажений. Эти обстоятельства, имеющие место в СЭЖД, необходимо учитывать при внедрении установок РГ. Пренебрежение этими факторами может привести к быстрому износу электрооборудования и даже выходу генераторов из строя.

Таблица 2

Экспериментальные данные при работе модели генератора в MATLAB на несимметричную нагрузку

Параметр	Обозначение	Величина						
Коэффициент несимметрии тока статора по обратной последовательности, %	k_{2I}	0	2,99	5,97	8,97	12,0	15,0	18,0
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности	k_{2U}	0	0,61	1,21	1,81	2,42	3,02	3,63
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %	k_{Ua}	0,001	0,33	0,66	0,99	1,31	1,62	1,93
	k_{Ub}	0,001	0,34	0,67	1,01	1,35	1,70	2,04
	k_{Uc}	0,001	0,34	0,68	1,02	1,37	1,72	2,07
Ток возбуждения, <i>о. е.</i>	$I_f^{(mid)}$	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
	$I_f^{(max)}$	0,79	0,80	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86
	I_{mf}	0	0,011	0,023	0,035	0,046	0,057	0,069
Ток статора (действующее значение), <i>о. е.</i>	I_A	0,430	0,44	0,449	0,453	0,461	0,469	0,477
	I_B	0,430	0,44	0,441	0,447	0,453	0,459	0,466
	I_C	0,430	0,42	0,404	0,391	0,378	0,365	0,352
Максимальная разность токов фаз, %	dI	0	2	4,5	6,2	8,3	10,4	12,5

Примечание: I_{mf} — амплитуда вынужденных колебаний частотой 100 Гц.

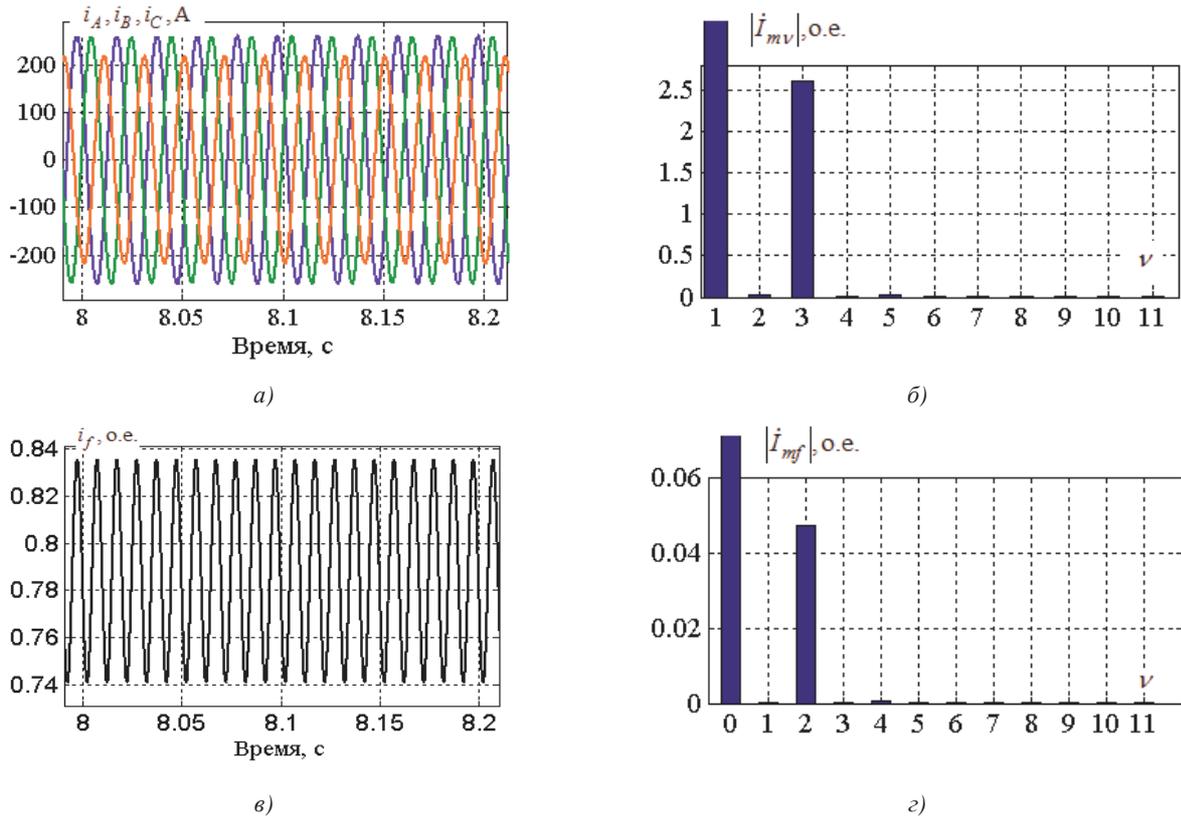


Рис. 5. Осциллограммы токов статора (а) и ротора (в) генератора и их гармонический состав (б, г) при $k_{2I} = 11,96\%$

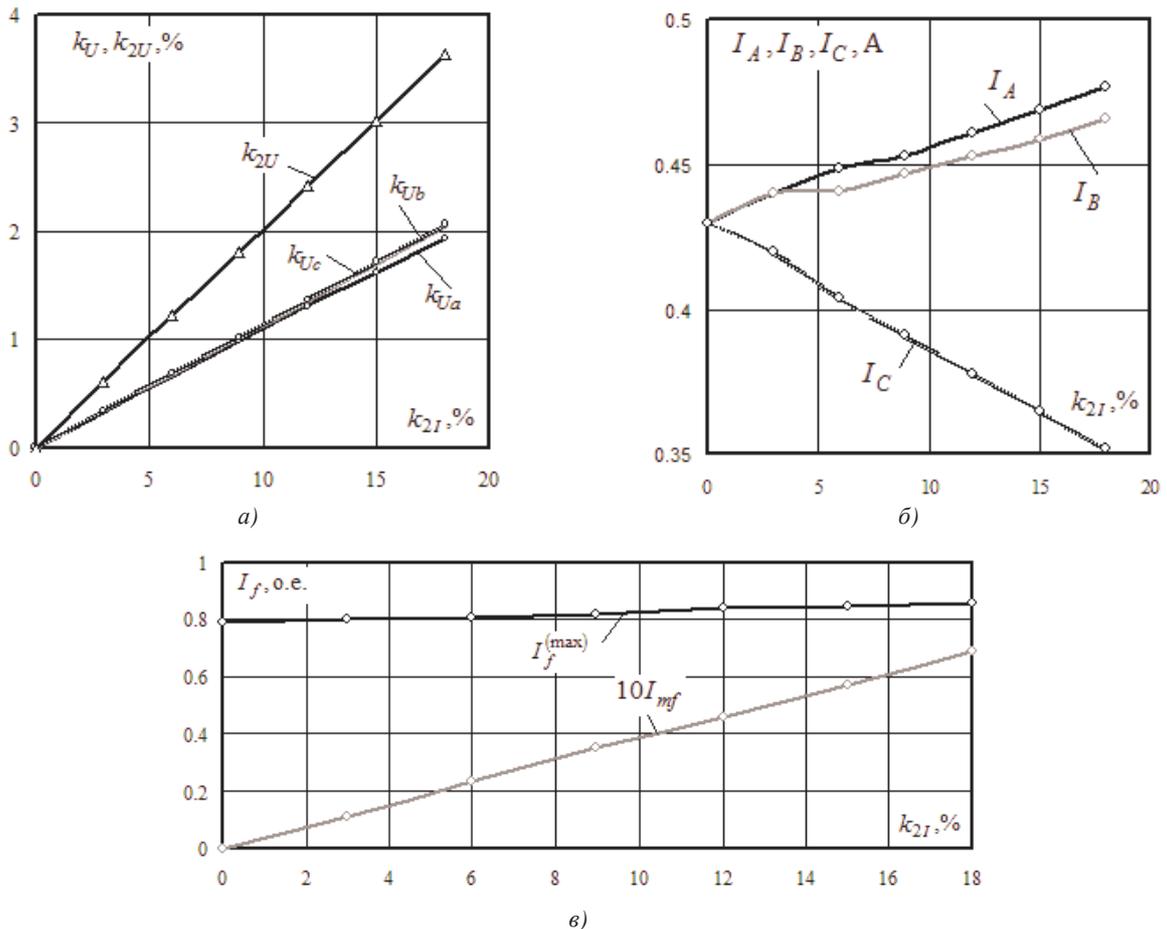


Рис. 6. Зависимость параметров режима генератора от коэффициента несимметрии токов k_{2I}

Описание физической модели и результатов исследования. Снимок исследуемой физической модели представлен на рис. 7.

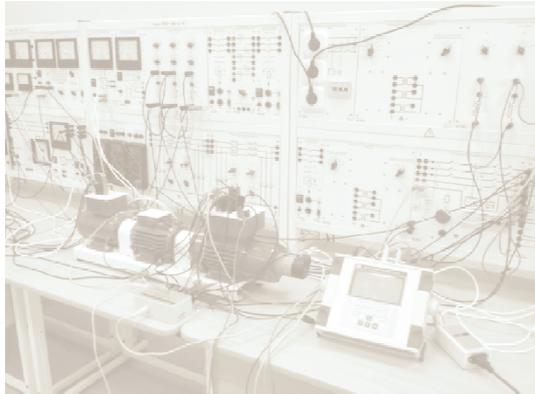


Рис. 7. Исследуемая физическая модель

Модель турбогенератора представляет собой спаренные электрические машины:

1) турбина моделируется машиной постоянного тока со следующими номинальными параметрами:

$P_{\text{ном}} = 90$ Вт; $U_{\text{я}} = 220$ В; $I_{\text{я}} = 0,56$ А; $U_f = 220$ В;
 $I_f = 0,2$ А; $n = 1\,500$ об/мин;

2) генератор моделируется синхронной машиной со следующими номинальными параметрами: $P_{\text{ном}} = 100$ Вт; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $I_{\text{ном}} = 0,24$ А; $\cos\varphi = 1$; $n = 1\,500$ об/мин; $U_f = 21$ В; $I_f = 1,75$ А.

Для увеличения инерции в блок спаренных электрических машин входит маховик.

Генератор в модели работал на активно-индуктивную нагрузку мощностью 30 В·А. Несимметрия создавалась путем увеличения мощности нагрузки в фазе А; при этом для сохранения полной загрузки СГ мощность нагрузки в других фазах уменьшалась. Для регулирования скорости вращения и напряжения генератора применялись ПИД-регуляторы. Ток возбуждения измерялся с помощью токовых клещей, работающих по принципу датчика Холла. Показатели качества электроэнергии, токи и напряжения измерялись с помощью прибора «Энергомонитор». Результаты экспериментальных данных представлены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные параметры режима физической модели генератора на несимметричную нагрузку

Параметр	Обозначение	Величина						
Коэффициент несимметрии тока статора по обратной последовательности, %	k_{2I} , %	6,10	9,76	16,3	20,8	24,7	28,4	40,9
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %	k_{2U} , %	0,82	1,24	1,74	2,10	2,36	2,45	3,21
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %	k_{Ua}	1,62	2,56	3,61	4,18	4,24	4,34	6,25
	k_{Ub}	2,09	2,32	3,11	4,27	4,41	4,71	5,82
	k_{Uc}	2,09	2,96	3,92	4,52	5,14	5,5	6,62
Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока k_I , %	k_{Ia}	1,51	2,26	2,89	3,71	3,97	4,19	5,62
	k_{Ib}	1,66	2,03	2,68	2,87	3,19	3,24	3,79
	k_{Ic}	1,89	2,97	3,82	4,48	4,84	5,11	6,86
Ток возбуждения, А	I_f	1,72	1,71	1,72	1,72	1,71	1,71	1,70
Ток статора прямой и обратной последовательности, А	I_1	0,082	0,082	0,080	0,077	0,073	0,067	0,066
	I_2	0,005	0,008	0,013	0,016	0,018	0,019	0,027
Напряжение прямой и обратной последовательности, В	U_1	223,4	224,9	225,9	227,0	227,3	227,4	228,3
	U_2	1,84	2,78	3,94	4,77	5,36	5,56	7,33
Фазные токи статора, А	I_{SA}	0,085	0,086	0,088	0,090	0,091	0,092	0,093
	I_{SB}	0,083	0,081	0,078	0,075	0,071	0,068	0,064
	I_{SC}	0,078	0,076	0,073	0,070	0,066	0,064	0,062
Максимальная разность токов фаз, %	dI	2,92	4,17	6,25	8,33	10,42	11,67	12,92
Фазные напряжения, В	U_{SA}	128,6	129,7	130,6	128,9	129,4	130,2	128,3
	U_{SB}	128,7	129,1	128,9	131,5	130,8	131,0	132,4
	U_{SC}	129,8	131,7	132,7	132,5	132,8	133,0	134,8

Экспериментальные данные, полученные с помощью физической модели генератора и представленные в табл. 3, 4 и на рис. 8, подтверждают описанные выше результаты компьютерного моделирования.

В результате проведенных исследований также было выявлено, что при работе генератора на несимметричную нагрузку в обмотке статора появляются высшие гармоники тока и напряжения, причем наибольшую амплитуду имеет третья гармоника.

В связи с тем, что генератор был загружен примерно на треть от номинальной мощности, максимальная разность токов фаз немного превысила допустимые 12 % только при величине k_{2I} , равной 40 %. Необходимо также отметить, что эффективное значение тока возбуждения генератора, работающего на несимметричную нагрузку, практически не изменяется. Зависи-

мости, представленные на рис. 8, немного отличаются от практически линейных, полученных в результате компьютерного моделирования. Отличия связаны с наличием целого ряда допущений, принимаемых при моделировании, а также с погрешностями измерений. Особенно это касается измерений токов при наличии гармонических искажений.

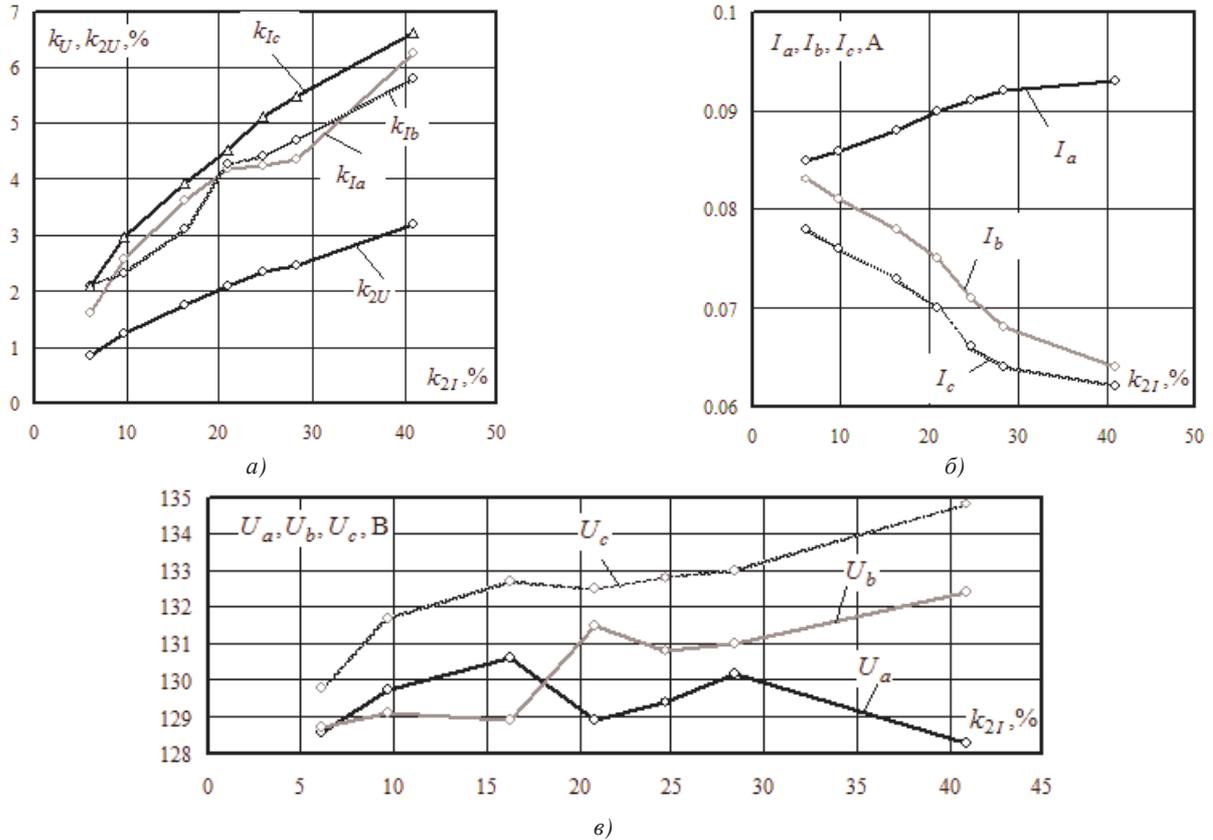


Рис. 8. Зависимость параметров режима генератора от коэффициента несимметрии токов k_{2I}

Таблица 4

Коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения генератора при несимметричной нагрузке

Номер гармоники	Коэффициенты гармоник напряжения			Коэффициенты гармоник тока		
	$k_{U(n)A}, \%$	$k_{U(n)B}, \%$	$k_{U(n)C}, \%$	$k_{I(n)A}, \%$	$k_{I(n)B}, \%$	$k_{I(n)C}, \%$
1	100	100	100	100	100	100
2	0,39	0,31	0,26	0,27	0,2	0,25
3	5,73	5,83	6,01	5,52	3,55	6,54
4	0,15	0,09	0,07	0,03	0,02	0
5	1,15	1,18	0,21	0,67	0,54	0,49
6	0,37	0,39	0,34	0,19	0,25	0,23
7	0,39	0,33	0,25	0,23	0,08	0,32
8	0,45	0,22	0,54	0,46	0,11	0,56
9	0,04	0,13	0,05	0	0,08	0
10	0,52	0,76	0,74	0,47	0,4	0,65
11	0,31	0,40	0,30	0,21	0,14	0,23
12	0,29	0,26	0,62	0,35	0,11	0,52
13	0,24	0,45	0,29	0,24	0,23	0,41
14	0,18	0,23	0,13	0,12	0,08	0,17
15	0,10	0,14	0,16	0,04	0,05	0,10

Заключение

1. По результатам компьютерного и физического моделирования было выявлено, что при работе генератора на несимметричную нагрузку появляется заметный ток обратной последовательности, который может превысить предельно допустимый по условиям нагрева. Генератор начинает генерировать в сеть высшие гармоники, что приводит к дополнительным нагревам.

2. Среднее значение тока возбуждения генератора, работающего на несимметричную нагрузку, практически не изменяется, но в обмотке возбуждения наводится ток частотой 100 Гц, амплитуда которого линейно возрастает при увеличении несимметрии нагрузки. Поэтому ток возбуждения и нагрузку генератора необходимо ограничивать.

3. Ограничение выдаваемой мощности генератора, работающего на несимметричную нагрузку, может быть определено по разности токов в фазах, которая не должна превышать 12 % от номинального тока.

Литература

1. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Вестн. ИрГТУ. 2009. № 1 (37). С. 190-195.

2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ушаков В.А., Алексеенко В.А. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.

3. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4 (36). С.162-167.

4. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Анализ симметрирующего эффекта распределенной генерации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 2. С.75-81.

5. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение технологий сетевых кластеров в системах электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Информационные и математические технологии в науке и управлении: сб. науч. ст. Иркутск, 2013. Ч. 1. С.115-120.

6. Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 160 с.

7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С.60-69.

8. Крюков А.В., Ушаков В.А., Чан Зюй Хынг. Снижение провалов напряжения в системах электроснабжения нетяговых потребителей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2014. Т. 2. С. 52-57.

9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.

10. Magdi S.M., Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.

11. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.

12. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.

13. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004. 336 с.

14. Барковский Б.С., Еремин Н.Е., Шалимов М.Г. Влияние несимметрии и несинусоидальности нагрузки на работу трансформаторов и турбогенераторов // Научные труды. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1964. Т. 53. 98 с.

15. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.

16. Игнатъев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 278 с.

17. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Разработка модели микропроцессорного автоматического регулятора возбуждения в среде MATLAB и оптимизация его настроек // Труды Братского государственного университета: Сер. Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 3-8.

18. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В., Попик В.А. Методика выбора оптимальных настроек систем АРЧВ генераторов электростанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С.192-198.

19. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 4 (8). С.106-113.

20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение алгоритмов согласованной настройки регуляторов турбогенераторов установки распределенной генерации // Труды Братского государственного университета: Сер. Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 130-139

References

1. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. The use of distributed generation technologies for electricity consumers not traction railway // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 2009. № 1 (37). P. 190-195.

2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. Operational management in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2012. 129 p.

3. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of power supply of the railroads // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 4 (36). P. 162-167.

4. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The analysis of the symmetrizing effect of the distributed generation // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2012. Т. 2. P. 75-81.

5. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The use of network technology clusters in power supply systems not traction consumers railways // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: sb. nauch. st. Irkutsk, 2013. Ch.1. P. 115-120.

6. Arsent'ev M.O., Arsent'ev O.V., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. The distributed generation in systems of power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 160 p.

7. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Indistinct regulators for the wind generator of installations // Izv. vuzov. Problemy energetiki. 2014. № 7-8. P. 60-69.

8. Kryukov A.V., Ushakov V.A., Chan Zyui Khyng. Reducing the voltage dips in the power supply to consumers not traction systems // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2014. Т. 2. P. 52-57.

9. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in railway power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.

10. Magdi S.M., Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.

11. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.

12. Markvardt K.G. The energy supply for electric railways. М.: Transport, 1965. 464 p.
13. Rules of technical operation of electric stations and networks of the Russian Federation. SPb.: Izd-vo DEAN, 2004. 336 p.
14. Barkovskii B.S., Eremin N.E., Shalimov M.G. Influence of unbalanced and non-sinusoidal load on the operation of transformers and turbine generators // Nauchnye trudy. Omsk: Zap. - Sib. kn. izd-vo, 1964. T. 53. 98 p.
15. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.
16. Ignat'ev I.V., Bulatov Yu.N. Models and methods of setting generator excitation control systems on the basis of experimental data. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 278 p.
17. Bulatov Yu.N., Popik V.A. Development of a model microprocessor automatic excitation regulator in MATLAB and optimization settings // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo un-
iversiteta: Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2011. T. 2. P. 3-8.
18. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V., Popik V.A. Methods of selecting optimal settings systems ARCV generators // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. № 1 (29). P. 192-198.
19. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Software system for identification of power systems and optimization of the coefficients of the stabilization automatic excitation controller // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2010. № 4 (8). P. 106-113.
20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Application of algorithms for coordinated tuning of controllers of turbine generators the installation of distributed generation // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. T. 2. P. 130-139.

УДК 621.311.25

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-93-98

Разработка технических решений для гелиоэлектростанций малой мощности

К.С. Никифоров^a, А.В. Струмельяк^b, Т.Н. Яковкина^c

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
nik.kot@mail.ru, volandis@mail.ru, jatano@yandex.ru
Статья поступила 26.07.2016, принята 19.08.2016

В работе представлена пятиуровневая концепция масштабируемой гелиоэлектростанции, предназначенной для снабжения малых потребителей электрической энергией. Сформулированы задачи, решаемые на каждом из уровней гелиоэлектростанции. Для каждого из пяти уровней гелиоэлектростанции разработаны соответствующие технические решения. Уровни включают в себя фотоэлектрические преобразователи, контроллеры точки максимальной мощности, контроллеры тока аккумуляторов и инверторов, свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, а также инверторы. Представлены основные технические характеристики фотоэлектрических преобразователей, разработанных на кафедре электроэнергетики и электротехники БрГУ. Предложены структурные схемы контроллеров точки максимальной мощности и контроллеров тока аккумуляторов и инверторов. Показано влияние каждого элемента гелиоэлектростанции на ее характеристики.

Ключевые слова: гелиоэлектростанция; фотоэлектрический преобразователь; контроллер точки максимальной мощности.

Technical decisions for solar power stations of low power

K.S. Nikiforov^a, A.V. Strumelyal^b, T.N. Yakovkina^c

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
nik.kot@mail.ru, volandis@mail.ru, jatano@yandex.ru
Received 26.07.2016, accepted 19.08.2016

The paper deals with five-leveled conception of a scalable solar power station for small consumers of electric power. The problems have been formulated to be solved at each level of solar power station. Technical solutions have been developed for every level of solar power station. The levels include photoelectric cells, maximum power point tracking controllers, electric current controllers for batteries and invertors, lead-acid batteries and power DC/AC invertors. Main technical characteristics have been presented for photoelectric converters, developed in Bratsk State University at the Department of Power Engineering and Electrical Engineering. Structural schemes have been proposed for maximum power point tracking controllers and electric current controllers of batteries and invertors. Influence of every part of solar power station on its characteristics has been shown.

Key words: solar power station; low power; electric power; controllers.