

Экспериментальные исследования переходных процессов при подключении возобновляемых источников электроэнергии к электрическим сетям*

*В.И. Чиндяскин, к.т.н., Е.В. Большаков, инженер,
ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Экспериментальное исследование переходных процессов при подключении возобновляемых источников электроэнергии к электрическим сетям проведено в Оренбургском ГАУ. Для моделирования переходных процессов были использованы стенд, изготовленный в ООО «Электролаб» (г. Челябинск), и авторские методики (рис. 1).

Стенд позволяет проводить следующие эксперименты: моделирование нормальной работы электрической сети, моделирование переходных процессов при подключении возобновляемого источника электроэнергии к электрической сети и отключении от неё, моделирование переходных процессов при коротком замыкании на источнике и нагрузке. Для записи осциллограмм переходных процессов используется USB-осциллограф АКИП 72204А.

Процесс осуществляется для условий параллельной работы возобновляемых источников электроэнергии с электрическими сетями [1–3]. Схема параллельной работы инвертора возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью представлена на рисунке 2.

Параллельное подключение генератора к электрической сети требует обязательного выполнения следующих условий:

– равенство действующих значений напряжений $U_1 = U_2$. Успешная синхронизация может быть выполнена при расхождении значений в 5–10%; регулируется изменением тока в обмотке возбуждения;

– равенство угловых частот $\omega_1 = \omega_2$ или частот $f_1 = f_2$. При недопустимо большой разнице значений частот (более 0,2 Гц) успешная синхронизация может быть не достигнута; подключаемый генератор может не втянуться в синхронизм;

– соответствие порядка следования фаз («фазировка») подключаемого генератора и сети;

– совпадение напряжений по фазе $\psi_1 = \psi_2$ или $\Theta = \psi_1 - \psi_2 = 0$.

Результаты исследования. В рамках исследования было проведено четыре эксперимента и составлены осциллограммы тока и напряжения в момент отключения возобновляемого источника электроэнергии от электрической сети и подключения к электрической сети, осциллограммы тока и напряжения при коротком замыкании на нагрузке при параллельной работе возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью (рис. 3–8).

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования Оренбургской области. Приказ РФФИ № 271 от 01.04.2016 г.

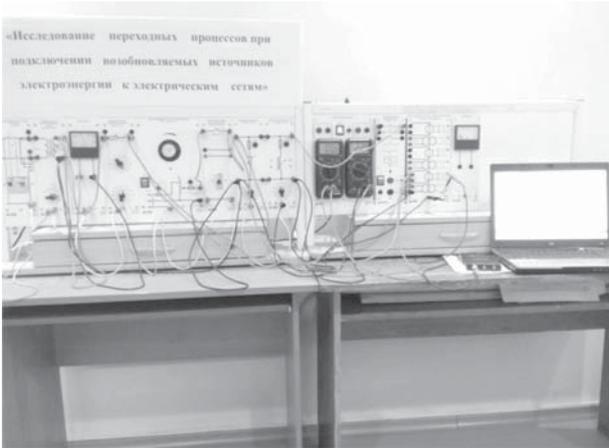


Рис. 1 – Стенд для моделирования переходных процессов

Анализ осциллограмм позволил сделать следующие выводы:

1. При отключении возобновляемого источника электроэнергии от электрической сети бросок тока составил 0,32 А (всплеск, рис. 3а), превышение амплитудного значения напряжения 16 В (всплеск, рис. 3б), что составляет 4,85%.

2. При подключении возобновляемого источника электроэнергии к электрической сети бросок тока составил 0,1 А (всплеск, рис. 4а), превышение амплитудного значения напряжения 19 В (всплеск, рис. 4б), что составляет 5,65%.

3. При коротком замыкании на нагрузке при параллельной работе возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью осциллограммы (рис. 5, 6) показывают нарушение синусоидальности.

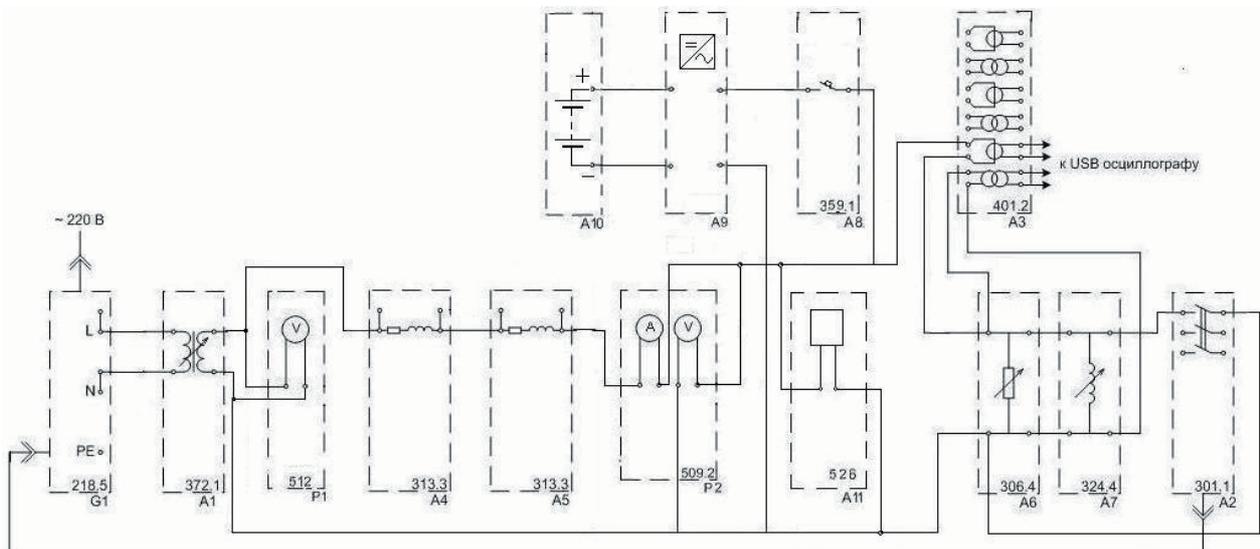


Рис. 2 – Схема параллельной работы инвертора возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью:

G1 – однофазный источник питания (~220В/10А); A1 – однофазный трансформатор (80ВА, 220/198 ... 242В); A2 – трёхполюсный выключатель (~400В/10А); A3 – блок измерительных трансформаторов тока и напряжения (600В/3В; 0,3А/3В); A4, A5 – модель линии электропередачи (~220В/0,3А); A6 – активная нагрузка (~220В/0...30Вт); A7 – индуктивная нагрузка (~220В/0...30ВАр); A8 – автоматический однополюсный выключатель (~230В/0,5А); A9 – инвертор МАП «Энергия» (=48В/~220В); A10 – батарея аккумуляторов (4шт. =48В); A11 – измеритель показателей качества электроэнергии ЭРИС-КЭ.05 (~220В); P1 – вольтметр (~500В); P2 – блок мультиметров (~700В)

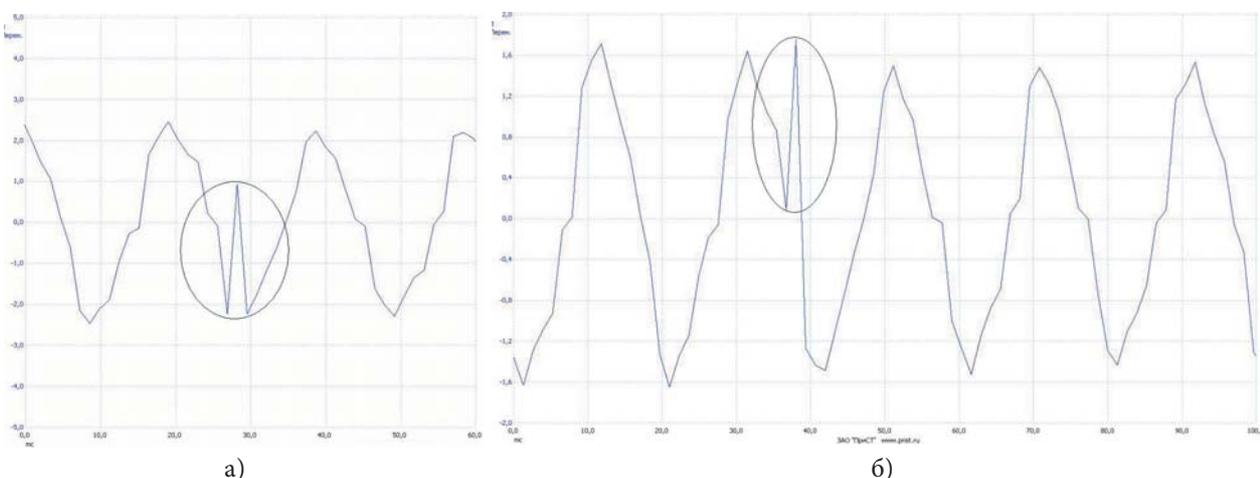


Рис. 3 – Эксперимент № 1. Осциллограммы тока и напряжения в момент отключения возобновляемого источника электроэнергии от электрической сети

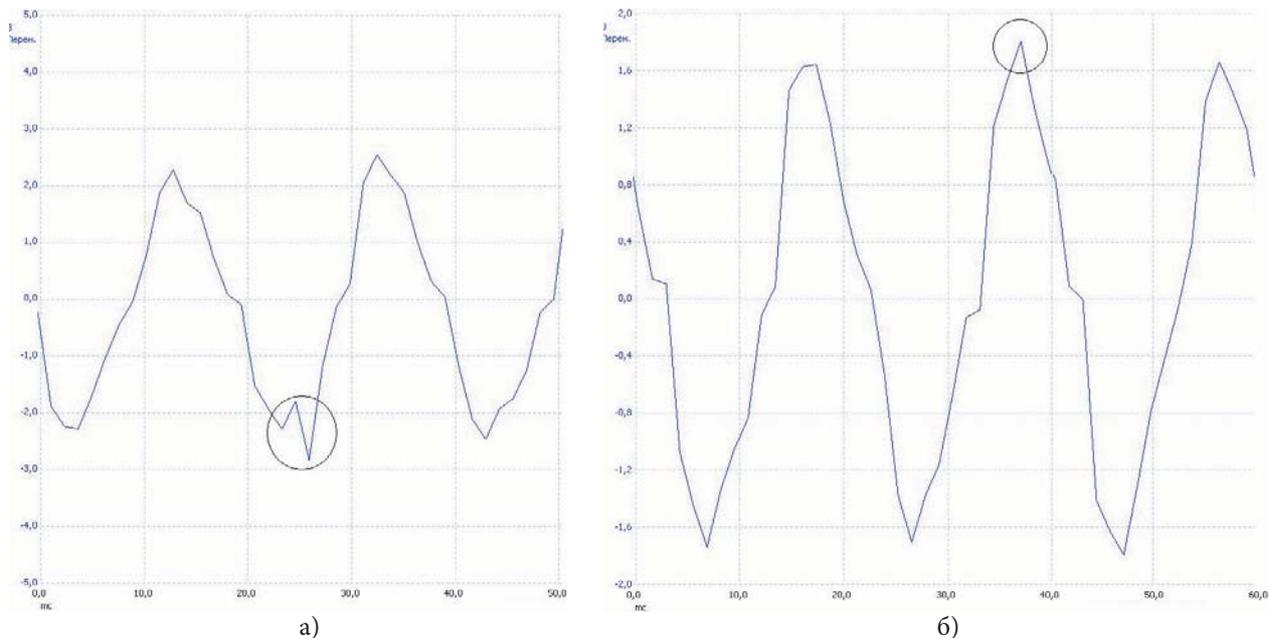


Рис. 4 – Эксперимент № 2. Осциллограммы тока и напряжения в момент подключения возобновляемого источника электроэнергии к электрической сети

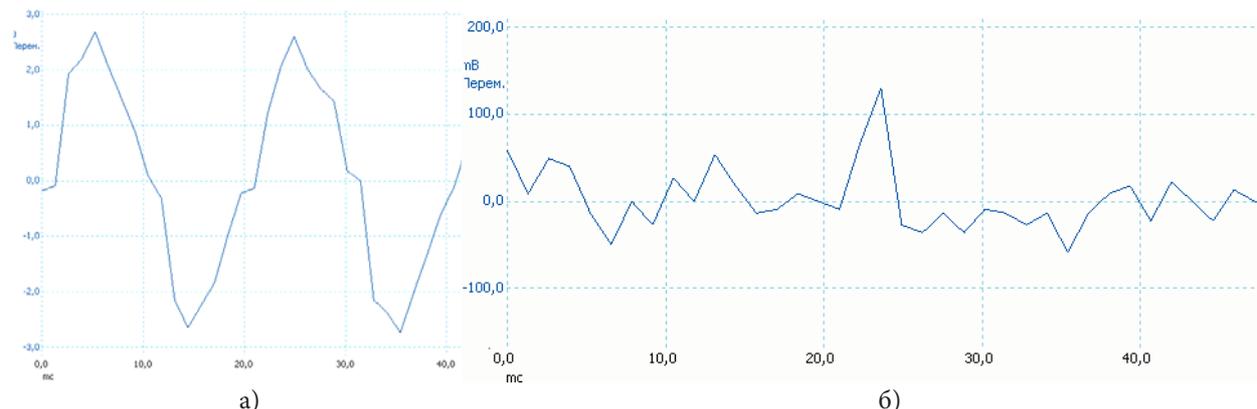


Рис. 5 – Эксперимент № 3. Осциллограмма тока при коротком замыкании (к.з.) на нагрузке при параллельной работе возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью: а) – ток до момента к.з.; б) – ток после момента к.з.

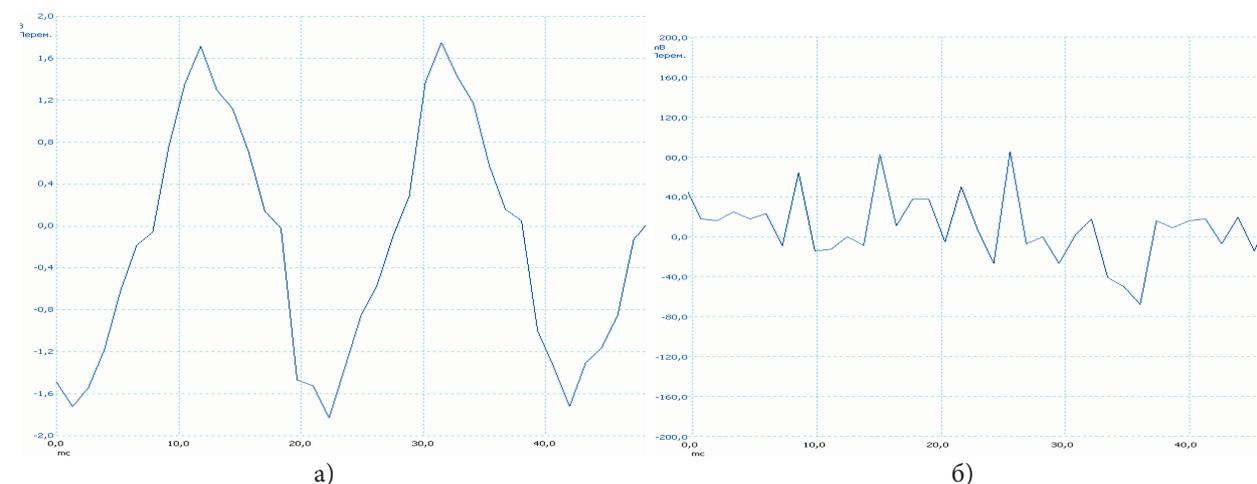


Рис. 6 – Эксперимент № 3. Осциллограмма напряжения при коротком замыкании на нагрузке при параллельной работе возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью: а) – напряжение до момента к.з.; б) – напряжение после момента к.з.

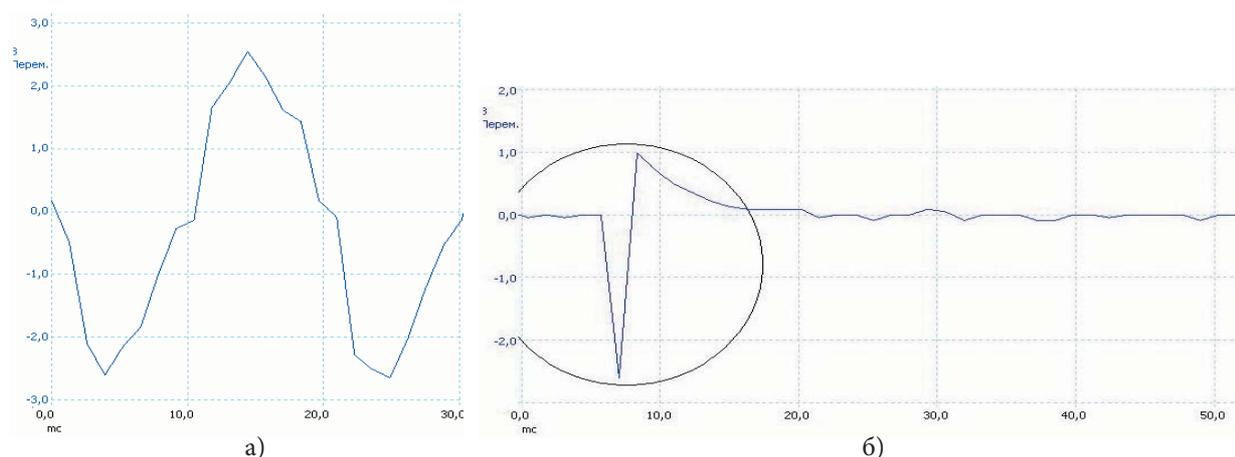


Рис. 7 – Эксперимент № 4. Осциллограмма тока при коротком замыкании на нагрузке, питающейся от возобновляемого источника электроэнергии:
а) – ток до момента к.з.; б) – ток при к.з.

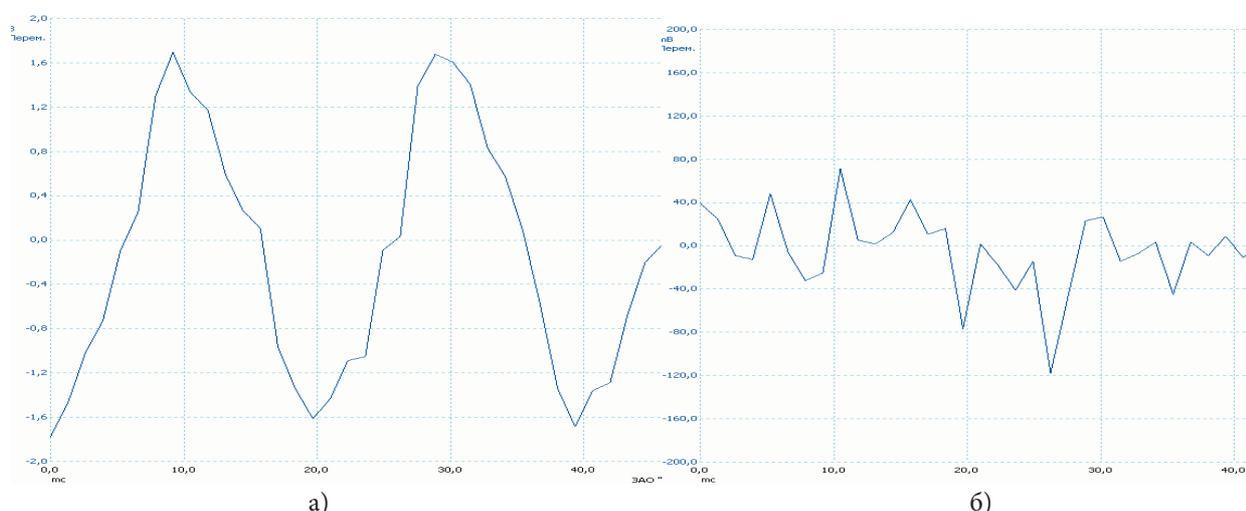


Рис. 8 – Эксперимент № 4. Осциллограмма напряжения при коротком замыкании на нагрузке, питающейся от возобновляемого источника электроэнергии:
а) – напряжение до момента к.з.; б) – напряжение после момента к.з.

соидальной формы кривых тока и напряжения и их затухание.

4. При коротком замыкании на нагрузке, питающейся от возобновляемого источника электроэнергии, всплеск тока составил 0,26 А (рис. 7) и далее затухание кривой тока. Осциллограммы напряжения (рис. 8) показывают нарушение синусоидальной формы кривой и их затухание.

Были измерены показатели качества электроэнергии. Экспериментальные данные показателей качества электроэнергии (ПКЭ) получены с помощью прибора ЭРИС-КЭ.05:

1. В соответствии с ГОСТом 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» в электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания $U_{ном}$ равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных систем).

В эксперименте фактическое значение напряжения на нагрузке составило $U = 216,402\text{В}$, которое входит в интервал $U_{ном} \pm 10\% = 198\text{--}242\text{В}$.

2. Согласно ГОСТу 32144-2013 отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2\text{Гц}$ в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4\text{Гц}$ в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Фактическое значение частоты $f = 50,00\text{Гц}$, которое входит в интервал $f_{ном} \pm 0,2\text{Гц} = 49,8\text{--}50,2\text{Гц}$.

3. Гармонические составляющие напряжения представлены в таблице.

Значения фактических коэффициентов гармонических составляющих напряжения не превышают соответствующих нормативных значений, кроме коэффициента гармонической составляющей 3-го порядка $KU(3) = 6,32\%$, которое превышает нормативное значение по ГОСТу 32144-2013 $KU(3) = 5,0\%$.

4. Фактический суммарный коэффициент гармонических составляющих $Ku = 6,59\%$ не превышает нормативное значение по ГОСТу 32144-2013 $Ku = 8,0\%$.

Гармонические составляющие напряжения

Порядок гармонической составляющей, n	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения, %		Значения в сравнении с нормативными
	фактический	нормативный по ГОСТу	
01	100		
02	0,03	2,0	не превышает
03	6,32	5,0	превышает
04	0,02	1,0	не превышает
05	1,47	6,0	не превышает
06	0,04	0,5	не превышает
07	1,27	5,0	не превышает
08	0,01	0,5	не превышает
09	0,78	1,5	не превышает
10	0,02	0,5	не превышает
11	0,43	3,5	не превышает
12	0,01	0,2	не превышает
13	0,33	3,0	не превышает
14	0,01	0,2	не превышает
15	0,13	0,3	не превышает
16	0,00	0,2	не превышает
17	0,30	2,0	не превышает
18	0,01	0,2	не превышает
19	0,06	1,5	не превышает
20	0,00	0,2	не превышает
21	0,08	0,2	не превышает
22	0,01	0,2	не превышает
23	0,07	1,5	не превышает
24	0,00	0,2	не превышает
25	0,05	1,5	не превышает
26	0,00	0,2	не превышает
27	0,01	0,2	не превышает
28	0,00	0,2	не превышает
29	0,02	1,5	не превышает
30	0,01	0,2	не превышает
31	0,03	1,5	не превышает
32	0,00	0,2	не превышает
33	0,02	0,2	не превышает
34	0,00	0,2	не превышает
35	0,03	1,5	не превышает
36	0,01	0,2	не превышает
37	0,02	1,5	не превышает
38	0,00	0,2	не превышает
39	0,02	0,2	не превышает
40	0,00	0,2	не превышает

Показатели качества электроэнергии при параллельной работе возобновляемого источника электроэнергии с электрической сетью – напряжение, частота, коэффициенты гармонических составляющих напряжения (кроме 3-й гармоники) и суммарный коэффициент гармонических составляющих соответствуют требованиям ГОСТа 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Таким образом, результаты экспериментального исследования переходных процессов при подключении возобновляемых источников к электрическим сетям показывают устойчивую работу электрических сетей с сохранением показателей

качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТа.

Литература

1. Чиндяскин В.И., Соловьёв С.А., Петрова Г.В. Рекомендации и предложения по созданию устойчивых и экономически эффективных локальных систем электроснабжения сельских поселений от 100 до 500 дворов на основе комплексного использования альтернативных источников электроэнергии. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 222 с.
2. Чиндяскин В.И., Митрофанов А.А. Специфика электроснабжения индивидуальных потребителей на базе автономных ВЭС // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. № 1 (39). С. 51–53.
3. Чиндяскин В.И., Гринько Д.В. Выбор оптимального решения для применения комбинированных установок на основе возобновляемых источников энергии // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 1 (45). С. 40–43.