

## ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. РАХМАНОВ Н. Р., канд. техн. наук АХМЕДОВА С. Т.

<sup>1)</sup>Институт физики НАН Азербайджана,

<sup>2)</sup>Азербайджанский научно-исследовательский  
и проектно-изыскательский институт энергетики

За последние 10–15 лет совершенствование технологии альтернативной энергетики (и в особенности повышение эффективности солнечных *PV*-преобразователей (solar *PV* modules) и ветроэнергоустановок) способствовало развитию распределительных электрических сетей и созданию систем распределенной генерации (РГ) со смешанным составом – традиционные и возобновляемые источники [1, 2]. Важной особенностью гибридных систем РГ является существенное отличие характеристик и режимов ее источников от характеристик традиционных источников энергосистемы. Это отличие состоит в том, что такие возобновляемые источники, как ветроагрегаты и солнечные *PV*-установки из-за неопределенности и прерывистости характеристик скорости ветра, уровня солнечной радиации, окружающей температуры имеют случайный, неопределенный характер выработки мощности. В связи с этим при росте мощности возобновляемых источников возникает необходимость проведения комплекса исследований, связанных с оценкой их влияния на систему в установившихся и переходных режимах.

Эти исследования дали основание считать системы РГ активными [3]. Вместе с тем для каждой энергосистемы в зависимости от структуры генерирующей мощности, наличия межсистемных связей, возможностей устройств регулирования режима (частоты, мощности, напряжения) требуется проведение более глубоких исследований процессов, возникающих от наличия в системе РГ с возобновляемыми источниками.

**Типовая схема и модель гибридной системы *DG* с возобновляемыми источниками.** Однолинейная схема гибридной (типичной) системы РГ в составе традиционного источника (дизель-генератора) и возобновляемых источников (ветроустановки и солнечной *PV*-системы) показана на рис. 1.

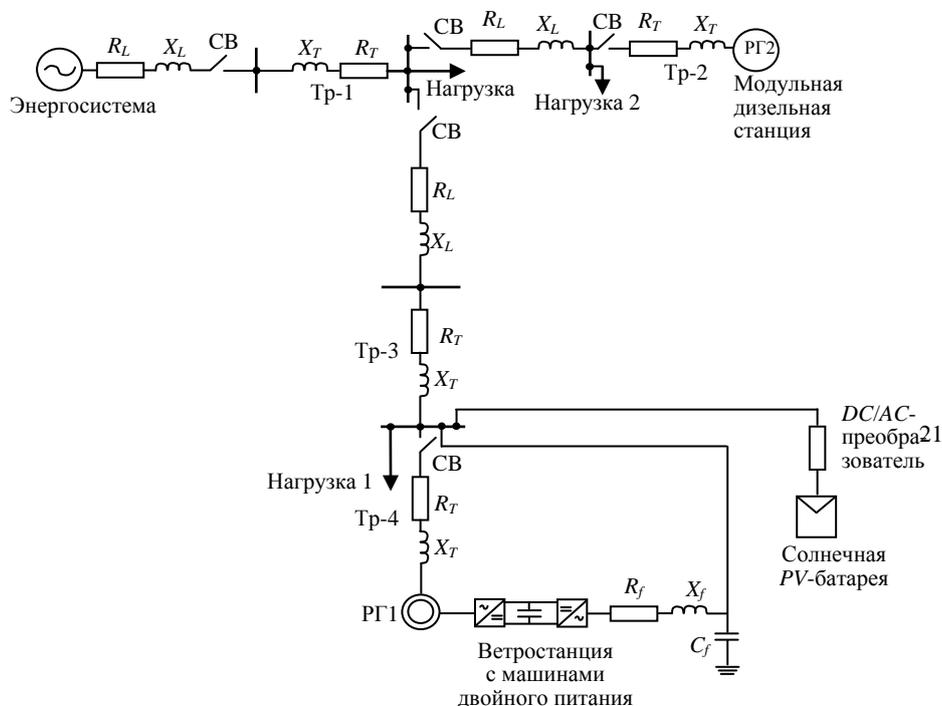


Рис. 1. Схема гибридной системы DG с возобновляемыми источниками

В схеме PV-система подсоединена к общей точке подключения (РСС) через инвертор DC/AC. Агрегаты ветростанции, представляющие собой ветротурбину с асинхронными генераторами двойного питания, также связаны с РСС. Агрегаты PV и WTG могут работать на максимум графика мощности или в режимах вне максимума. Величины изменения скорости ветра и солнечной радиации используются в модулях WTG и PV с целью моделирования выработки мощности этими источниками в системе РГ.

Для расчета и анализа режима в гибридной системе распределенной генерации с возобновляемыми источниками (РГВИ) и оценки ее влияния на переходные процессы в электрической сети энергосистемы составлены динамические модели синхронного дизель-генератора, а также для ветроагрегата с асинхронным генератором двойного питания и солнечных PV-комплектов. Имитация режимов в системе РГВИ с моделями указанных источников выполнена в формате программы ЕТАР-6 [4].

**Моделирование PV-источников.** Эквивалентная схема PV-панели с подключенной нагрузкой показана на рис. 2. Параметры PV-панели приведены в табл. 1.

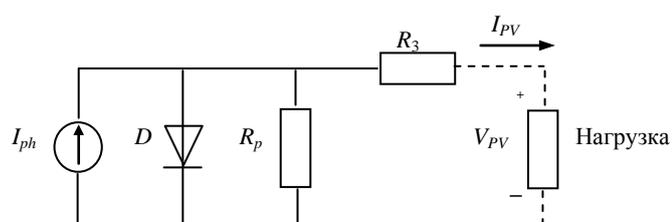


Рис. 2. Эквивалентная схема PV-панели с подключенной нагрузкой

Таблица 1

Параметры PV-панели

Обозначение	Описание	Значение
$V_{oc}$	Номинальное напряжение открытой цепи	403 В
$I_{PV}$	Ток PV-панели	
$I_{Sat}$	Модуль обратного тока насыщения	
$q$	Заряд электрона	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
$A$	Коэффициент идеальности	1,50

$K$	Постоянная Больцмана	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
$R_S$	Последовательное сопротивление $PV$ -ячейки	
$R_P$	Параллельное сопротивление $PV$ -ячейки	
$I_{SSO}$	Ток короткого замыкания (КЗ)	3,27 А
$K_i$	Температурный коэффициент при токе КЗ	$1,7 e^{-3}$
$T_r$	Номинальная температура	301,18 К
$I_{rr}$	Обратный ток насыщения при $T_r$	$2,0793 e^{-6}$ А
$E_{gap}$	Энергия пробоя кремния	1,1 eV
$n_p$	Число параллельных ячеек	40
$n_s$	Число последовательных ячеек	900
$S$	Уровень солнечной радиации	0~1000 Вт/м <sup>2</sup>
$T$	Температура на поверхности $PV$	350 К

Выдаваемый ток с  $PV$ -панели определяется из следующих уравнений [5, 6]:

$$I_{PV} = n_p I_{Ph} - n_p I_{Sat} \left[ \exp \left( \left( \frac{q}{AkT} \right) \left( \frac{V_{PV}}{n_s} + I_{PV} R_S \right) \right) - 1 \right]; \quad (1)$$

$$I_{Ph} = (I_{SSO} + k_i (T - T_r)) \frac{S}{1000}; \quad (2)$$

$$I_{Sat} = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{qE_{gap}}{kA} \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right). \quad (3)$$

**Моделирование ветроагрегата.** Выходная мощность ветротурбины  $P_m$  определяется как

$$P_m = 0,5 \rho A C_p (\lambda, \beta) v_m^3, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $A_p$  – ометаемая ротором поверхность;  $v_m$  – скорость ветра;  $C_p (\lambda, \beta)$  – коэффициент мощности, который является функцией  $\lambda$  (относительной скорости) и  $\beta$  (угла разворота лопастей (угол тандажа)) ротора.

Уравнения динамики напряжений и токов асинхронной машины в синхронно вращающихся координатах  $d$ - $q$  описываются в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} U_{dS} \\ U_{qS} \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dS} \\ i_{qS} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_{dS} \\ \lambda_{qS} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_1 \lambda_{qS} \\ \omega_1 \lambda_{dS} \\ -\omega_2 \lambda_{qr} \\ \omega_2 \lambda_{dr} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dS} \\ \lambda_{qS} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_S & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_S & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dS} \\ i_{qS} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Уравнение движения ротора ветроагрегата с двойным питанием запишется в виде

$$\frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_{em}, \quad (7)$$

$$T_{em} = n_p L_m (i_{qS} i_{dr} - i_{dS} i_{qr}). \quad (8)$$

Здесь  $U_{dS}, U_{qS}$  и  $i_{dS}, i_{qS}$  – напряжение и ток статора в осях  $d$  и  $q$  соответственно;  $U_{dr}, U_{qr}$  и  $i_{dr}, i_{qr}$  – напряжение и ток ротора в осях  $d$  и  $q$ ;  $L_S, L_r$  – индуктивность статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $\lambda_{dS}, \lambda_{qS}$  и  $\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$  – потокосцепление статора и ротора по  $d$  и  $q$ ;  $\omega_1, \omega_2$  – синхронная угловая скорость и скорость скольжения соответственно:  $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$ ;  $T_m, T_{em}$  – механический и электромагнитный моменты.

Номинальные значения параметров ветростанции с двойным питанием приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры ветроагрегата с двойным питанием

Обозначение	Описание	Значение
$P_{ном}$	Номинальная мощность	2000 кВт
$U_{ном}$	Номинальное напряжение	690 В
$R_S$	Сопротивление статора	0,007 о. е.
$L_S$	Индуктивность статора	0,171 о. е.
$R_r$	Сопротивление ротора	0,005 о. е.
$L_r$	Индуктивность ротора	0,156 о. е.
$L_m$	Взаимная индуктивность	2,9 о. е.
$J$	Инерция ротора	5,04
$n_p$	Число полюсов	6
$U_{DCном}$	Номинальное напряжение сети DC AC-DC-AC-преобразователя	800 В
$P_m$	Номинальная механическая мощность	1800 кВт

Если синхронно вращающиеся оси  $d$ – $q$  ориентировать на вектор напряжения статора в соответствии с [7], можно получить следующие уравнения:

$$i_{dS} = -\frac{L_m}{L_S} i; \quad T_{em} = n_p \frac{L_m}{L_S} \lambda_S i_{dr}; \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{L_S L_r - L_m^2}{L_S L_r}; \quad (10)$$

$$U_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - (\omega_1 - \omega_r) (L_m i_{qS} + L_r i_{qr});$$

$$U_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - (\omega_1 - \omega_r) (L_m i_{dS} + L_r i_{dr}). \quad (11)$$

**Моделирование генератора дизель-агрегата.** На практике для исследования динамических режимов дизель-генератора широко используется модель Park [8], которая представлена в виде следующих уравнений:

- для цепи статора:

$$U_d = e'_d - r_S i_d + x''_q i_q; \quad (12)$$

$$U_q = e''_q - r_S i_q + x''_d i_d; \quad (13)$$

- для цепи ротора:

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{e_f + (x_d - x'_d) i_d - e'_q}{T'_{do}}; \quad (14)$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{-e'_d + (x_q - x'_q) i_q}{T'_{do}}; \quad (15)$$

$$\frac{de''_q}{dt} = \frac{(e'_q - e''_q) + (x'_d - x''_d) i_d}{T''_{do}}; \quad (16)$$

$$\frac{de''_d}{dt} = \frac{(e'_d - e''_d) + (x'_q - x''_q) i_q}{T''_{do}}. \quad (17)$$

Уравнение моментов – это уравнение движения ротора

$$T_j \frac{d\omega_r}{dt} = M_{dis} - M_g, \quad (18)$$

где  $M_g$  – электромагнитный момент генератора

$$M_g = e''_d i_d + e''_q i_q - (x'_d - x''_d) i_d i_q. \quad (19)$$

Параметры генератора дизель-агрегата приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Параметры генератора дизель-агрегата**

Обозначение	Описание	Значение
$P_{\text{ном}}$	Номинальная мощность	16,62 МВт
$U_{\text{ном}}$	Номинальное напряжение	10,5 кВ
$r_s$	Сопротивление статора	0,053 Ом
$T_j$	Инерция ротора	1,4
$n_p$	Число полюсов	8
$n$	Угловая скорость	750 об/мин

**Моделирование системы РГВИ в установившихся режимах.** Моделирование установившегося режима рассматривается на примере схемы РГВИ действующей в системе «Азерэнерджи» (рис. 3). Расчеты режимов выполнены для различных вариантов выработки мощности на ветростанции и модульной дизельной станции. В табл. 4 приводятся результаты расчетов для режимов покрытия мощности нагрузки, присоединенной к шинам ветростанции на 25 и 50 % от выработки ее мощности.

Как видно из табл. 4, отключение связи сети РГВИ с энергосистемой уменьшает суммарную генерацию в сети на 8 % и соответственно снижается напряжение в общей точке подключения на величину, немного большую, чем нормально допустимая (5,5 %). При этом уменьшение покрытия нагрузки в основном достигается за счет роста выработки мощности на модульной дизельной станции при 25 % мощности от ВЭС.

Рис. 3. Схема РГВИ в системе «Азерэнерджи»

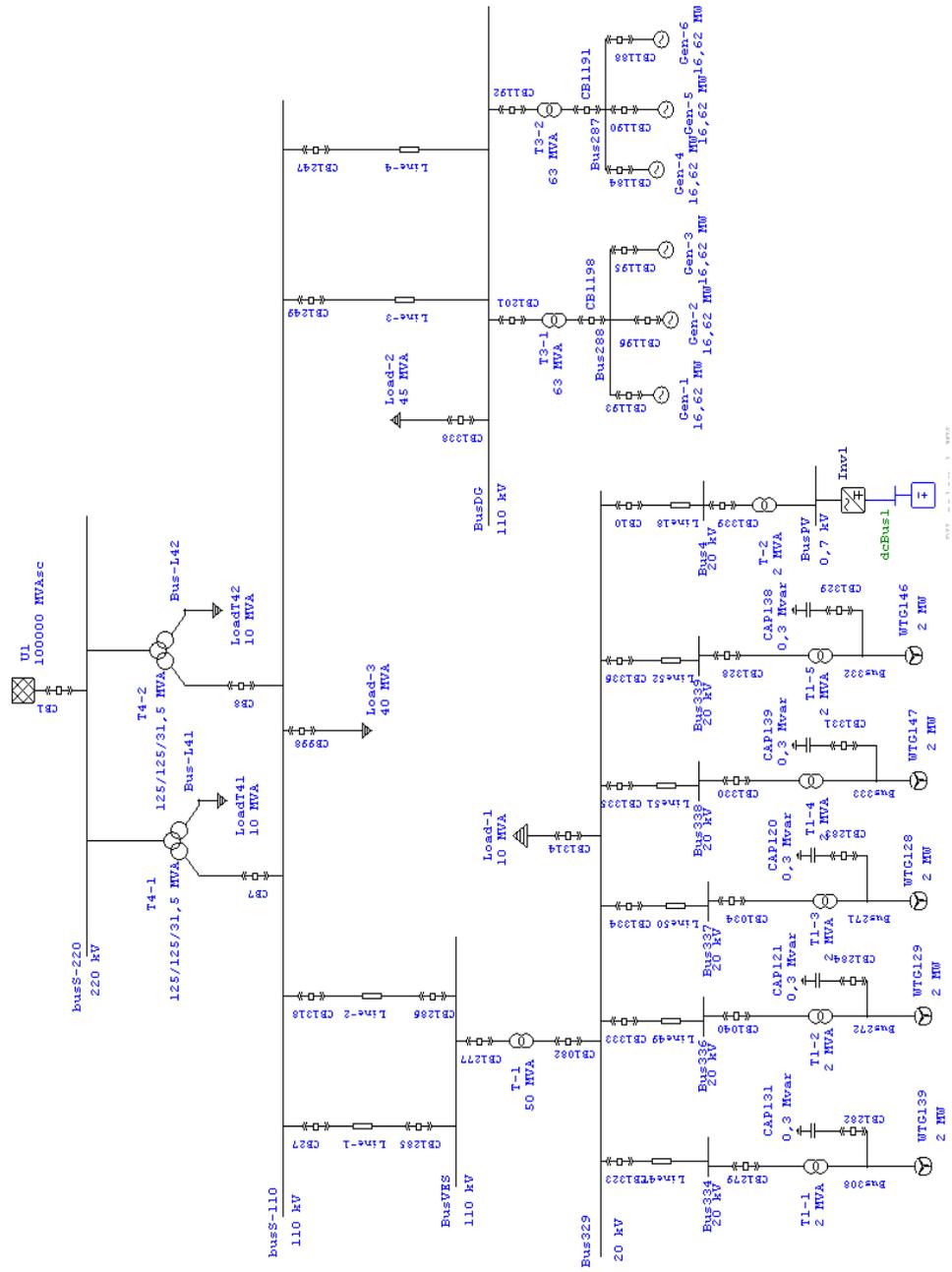


Таблица 4

Параметры режима сети РГВИ при наличии и отсутствии связи с энергосистемой

Параметр режима	Значение параметра			
	При наличии связи сети РГВИ с системой		При отсутствии связи сети РГВИ с системой	
	ВЭС 50 %	ВЭС 30 %	ВЭС 50 %	ВЭС 30 %
Мощность генерации, МВт:				
от энергосистемы	37,0	11,6	0	0
от модульной станции	44,0	71,8	74,3	76,6
от ветростанции	5,0	2,5	5,0	2,5
Мощность нагрузки, МВт:				
в общей точке подключения	36,2	36,1	33,2	33,1
на шинах модульной станции	40,6	40,7	37,6	37,6
на шинах ветростанции	9,2	9,2	8,4	8,4
Напряжение в общей точке подключения, кВ	108,7	108,6	104,1	104,0

**Моделирование системы РГВИ в переходных режимах.** Проведены исследования переходных режимов в системе РГВИ, вызванных возмущениями во внешней сети энергосистемы «Азербээнержи». На рис. 4 показана упрощенная однолинейная схема системы, к которой в узле п/ст 220/110 кВ Сангачал подключена система РГВИ, представленная на рис. 1. Параметры источников модульной солнечной PV-станции, ветростанции и дизельной станции приведены в табл. 1–3. В системе РГВИ исследовали переходные процессы при имитации коротких замыканий на ЛЭП, связанных с узлом подключения РГВИ. Полное моделирование режима при указанных возмущениях выполняли с помощью программного комплекса ЕТАР-6 [4]. Анализировали электромеханические качания агрегатов дизельной и ветростанции. Оценивали их влияние на колебание мощности в ЛЭП внешней сети, связанное с узлом общего подключения.

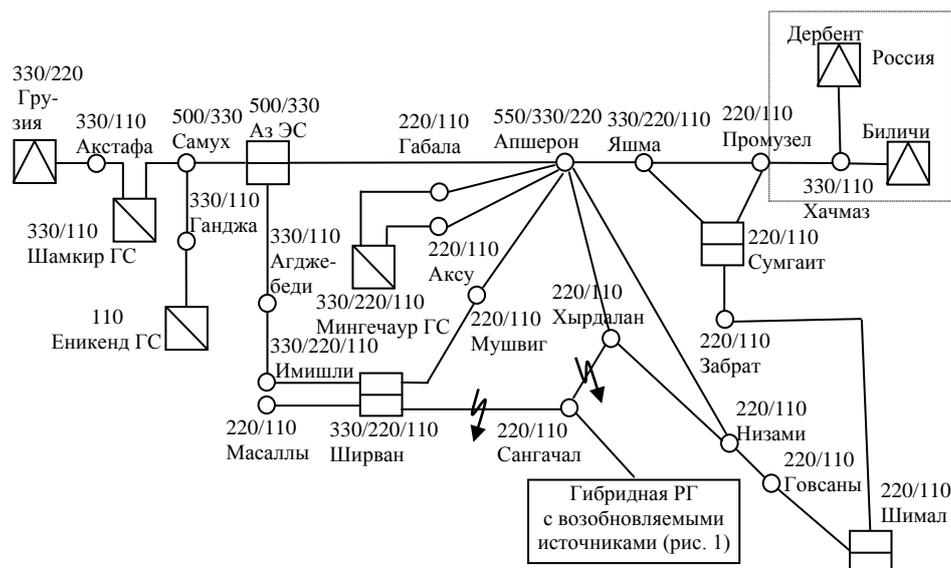


Рис. 4. Однолинейная схема энергосистемы Азербайджана

Каждая станция гибридной РГ – дизельная, ветровая и солнечная – отдельными линиями электропередачи через общую точку подключена к энергосистеме (п/ст 220/110 кВ Сангачал). Параметры источников солнечной PV-станции, ветростанции и дизельной станции приведены в табл. 1–3 соответственно.

Параметры схемы электрической сети РГ (трансформаторов, линий электропередачи и нагрузок) приведены ниже:

- трансформатор Т-1: номинальная мощность 125/125/31,5 МВ·А; номинальное напряжение 220/110/10,5 кВ;  $\%Z = 11,4/21,9/35,7$ ;  $X/R = 37/71/46$  о. е.;
- трансформатор Т-2: номинальная мощность 63 МВ·А; номинальное напряжение 110/10,5 кВ;  $\%Z = 12,5$ ;  $X/R = 34,1$  о. е.;
- трансформатор Т-3: номинальная мощность 50 МВ·А; номинальное напряжение 110/20 кВ;  $\%Z = 12,5$ ;  $X/R = 29,5$  о. е.;
- трансформатор Т-4: номинальная мощность 2 МВ·А; номинальное напряжение 20/0,7 кВ;  $\%Z = 6,25$ ;  $X/R = 7,098$  о. е.;
- трансформатор Т-5: номинальная мощность 2 МВ·А; номинальное напряжение 20/0,7 кВ;  $\%Z = 6,25$ ;  $X/R = 7,098$  о. е.

Линии распределительной сети (DL): DL-1, DL-2, DL-3, DL-4; длина каждой линии – 5 км соответственно; напряжение 110 кВ;  $R = 0,306$  Ом·км;  $X = 0,434$  Ом·км;  $Y = 2,6$  Ом·км.

Номинальные значения нагрузок:  $L_1 = 40$  МВт; 15 Мвар;  $L_2 = 45$  МВт; 15,3 Мвар;  $L_3 = 40$  МВт; 15 Мвар.

В системе РГ исследовали переходные процессы, вызванные возмущениями в электрической сети энергосистемы при имитации коротких замыканий или отключениях линий. Полное моделирование режима при указанных возмущениях выполняли с помощью программного комплекса ЕТАР-6. Анализировали электромеханические качания каждого отдельного источника и оценивали их влияние на протекание процессов в энергосистеме.

Кривые изменения относительных углов генераторов станции Ширван и модульной станции Сангачал, размещенной в системе РГВИ, после отключения трехфазного КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал и Ширван – Сангачал соответственно приводятся на рис. 5а, б. Время отключения КЗ – 0,12 с.

Сравнивая колебания углов на рис. 5а, б, нетрудно видеть, что амплитуды для случая КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал превышают соответствующие значения при КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал. Кроме того, анализ показывает, что колебания углов роторов генераторов модульной станции и станции Ширван совершаются с одинаковой периодичностью, равной примерно 1,6 с. Эти колебания практически затухают через 4–5 периодов. Кроме того, кривая колебания угла модульного генератора содержит также составляющую с периодом 0,35 с, которая характеризует собственные колебания ротора генератора, также затухающие примерно через 1,4–1,6 с, что соответствует инерционной постоянной дизель-агрегата. Из огибающей кривой угла ротора генератора, характеризующей качание системы от КЗ с периодом примерно 5,6–6,0 с, видно, что коэффициент линейного затухания этого качания равен 0,34.

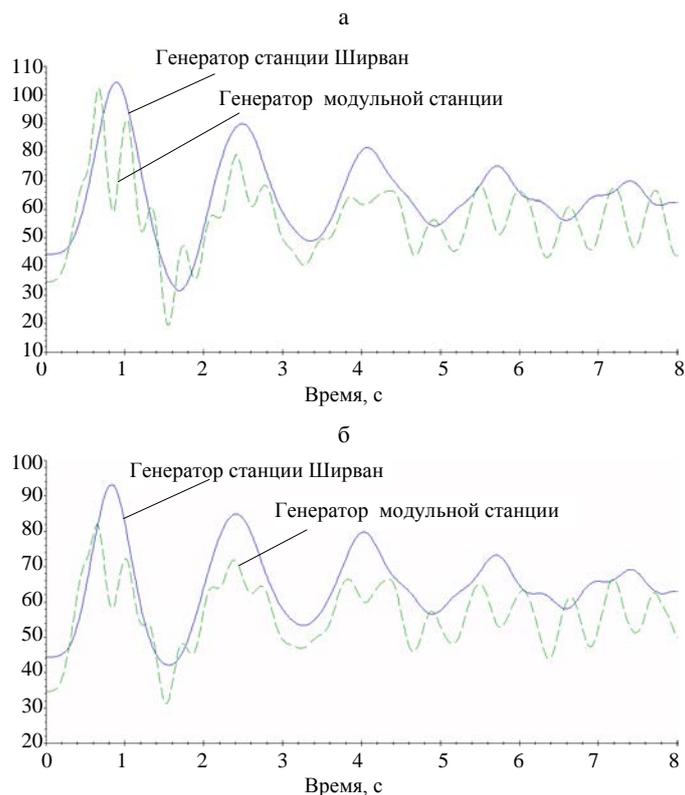


Рис. 5. Колебания углов роторов генераторов станции Shirvan и модульной станции Сангачал после отключения трехфазного КЗ:  
 а – на ЛЭП 220 кВ Хырдалан – Сангачал; б – на ЛЭП 220 кВ Shirvan – Сангачал

## ВЫВОДЫ

1. Рост тенденции развития систем распределенной генерации с комбинированным использованием традиционных и возобновляемых источников выявил необходимость разработки новых технических условий функционирования энергосистемы, учитывающих наличие разнохарактерных генерирующих источников в распределительных сетях. В связи с этим при росте мощности возобновляемых источников важным является проведение комплекса исследований, связанных с оценкой их влияния на внешнюю энергосистему в установившихся и переходных режимах.

2. Разработана типовая модель распределенной генерации с базовыми возобновляемыми источниками – ветроустановки, солнечные PV-установки и традиционные источники – дизельные энергоустановки. Выведены уравнения, описывающие системы РГВИ в установившихся и переходных режимах для разных вариантов выработки мощности и нагрузки.

3. Составлены условия баланса мощности при работе сети РГВИ с энергосистемой и ее изолированной работе при разных участиях ветростанции в этом балансе. При автономной работе РГВИ для полного покрытия ее нагрузки необходима значительная доля выработки от дизельной станции.

4. Моделирование переходного процесса в системе РГВИ при возмущениях во внешней системе позволяет выявить степень влияния выработки

мощности на возобновляемых источниках на электромеханические колебания углов генераторов внешней системы, а также определить качание внешней системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C o m b i n e d AC-DC micro grids: case study-network development and simulation / N. R. Rahmanov [et al.] // Proceedings Plenary lecture no. 00PLL03 8<sup>th</sup> International Conference ICTPE-2012, Fredrikstad, Norway, 5–7 September. – Fredrikstad, 2012. – P. 8–12.
2. H y b r i d distributed generation systems with renewable sources: study operation conditions with GRID / N. R. Rahmanov [et al.] // Proceedings OF 8<sup>th</sup> International Conference ICTPE-2012, Fredrikstad, Norway, 5–7 September. – Fredrikstad, 2012. – P. 286–292.
3. N e w ERA for Electricity in Europe. Distributed Generation: Key issues, challenges and Proposed Solutions European Commission: EUR 20901, 2003, ISBN 92-894-6262-0.
4. E T A P Power Station 6.0. Electrical transient Analyzer Program. Operation Technology, inc. February 2002, southern California.
5. R o p p, M. E. Development of Matlab/Simulink model of single-phase grid-connected photovoltaic system / M. E. Ropp, S. Gonzalez // IEEE Trans. Energy Conv. – 2009. – Vol. 24, No 1. – P. 195–202.
6. C h a o, K. H. Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model / K. H. Chao, C. J. Li, S. H. Ho // IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technol., Nov., 2008. – P. 290–294.
7. L i n, X. A. Hybrid AC/DC Micro grid and its Coordination Control / X. Lin, P. Wang, P. Chiang // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2011. – Vol. 2, No 2. – P. 278–286.
8. A b u r, A. Power System state Estimation: Theory and Implementation / A. Abur, A. G. Exposi. – New York: Marcel Dekkar, 2004.

Представлена Ученым советом  
Института физики НАН Азербайджана

Поступила 25.10.2012

УДК 621.341.572

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Канд. техн. наук, доц. БУРЛАКА В. В.<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. ГУЛАКОВ С. В.<sup>1)</sup>,  
инж. МАТЯШОВА Т. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Приазовский государственный технический университет,

<sup>2)</sup>ПАО «ММК имени Ильича»

Использование рекуперативных преобразователей является одним из наиболее доступных и известных путей экономии энергоресурсов. Преобразователи с возможностью возврата энергии в сеть нашли широкое применение в частотно-регулируемом электроприводе. Рекуперация энергии в сеть существенно экономит энергоресурсы, так как позволяет отказаться от тормозного резистора, на котором энергия рассеивается в виде теплоты.

подавляющее большинство преобразователей частоты (ПЧ) с напряжением питания 0,4 кВ, используемых в частотно-регулируемом электро-