

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»  
«Академия электротехнических наук Чувашской Республики»

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ЭНЕРГЕТИКИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**Материалы  
III Международной научно-технической  
конференции**

Чебоксары  
2019

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43  
П78

*Редакционная коллегия:*

**В.Г. Ковалев**, канд. техн. наук, профессор (гл. редактор);  
**Г.С. Нудельман**, канд. техн. наук, профессор;  
**В.А. Щедрин**, канд. техн. наук, профессор (зам. гл. редактора);  
**В.В. Афанасьев**, д-р техн. наук, профессор;  
**Ю.М. Миронов**, д-р техн. наук, профессор;  
**Г.П. Свинцов**, д-р техн. наук, профессор;  
**А.А. Ильин**, канд. техн. наук, доцент;  
**О.А. Онисова**, канд. техн. наук, доцент

*Печатается по решению Научно-технического совета  
Чувашского государственного университета*

**П78 Проблемы** и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – 618 с.

ISBN 978-5-7677-2998-2

Представлены статьи и доклады третьей Международной научно-технической конференции, проведенной совместно с «Академией электротехнических наук Чувашской Республики», в которых приводятся и обсуждаются результаты актуальных научных исследований в области энергетики, электротехники и энергоэффективности, а также рассматриваются вопросы подготовки инженерных кадров.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-2998-2

УДК 621.3(06)  
ББК 31я43

© Издательство  
Чувашского университета, 2019

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

**Фёдоров А-й.О., Солдатов А.В., Петров В.С.,** Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: fedorov\_a@ekra.ru.

***Аннотация.** В настоящем докладе представлена математическая модель асинхронизированного генератора ветряной электростанции, учитывающая особенности его функционирования при коротком замыкании в сети.*

***Ключевые слова:** ветряная электростанция, асинхронизированный генератор, схема замещения, ток короткого замыкания*

### **Введение**

В последнее десятилетие в мире наблюдается тенденция перехода от централизованного электроснабжения к распределенной генерации. При этом предпочтение отдается возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

Доля ВИЭ в общем балансе установленной мощности энергосистемы России с каждым годом растет. Однако их влияние на энергосистему в полной мере не изучено. Так поведение традиционных систем РЗА может быть непредсказуемым в условиях постоянного роста доли ВИЭ в общей установленной мощности электрических станций ЕЭС России, что в перспективе может оказать негативное влияние на ее надежность и устойчивость. В связи с чем необходимы исследования надежности функционирования устройств РЗА распределительной сети с ВИЭ. Для проведения исследований требуются математические модели объектов распределенной генерации, позволяющие анализировать основные свойства алгоритмов РЗА в различных режимах работы сети.

В докладе рассматривается математическая модель асинхронизированного ветрогенератора (АСВГ) – одного из наиболее сложных с точки зрения моделирования элементов распределенной генерации (рис. 1). Модель позволяет рассчитывать токи статора и ротора при различных видах КЗ в сети как в установившемся, так и в переходном режимах.

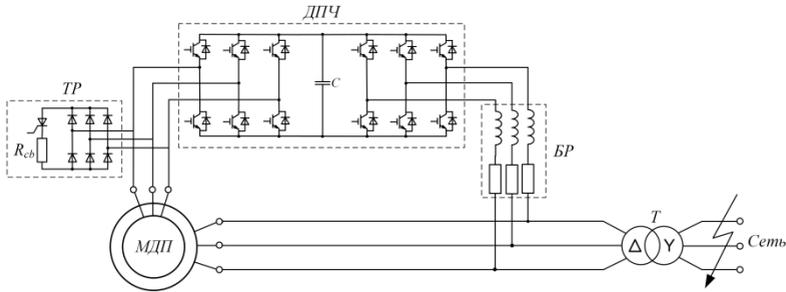


Рис. 1. Схема АСВГ: ДПЧ – двухзвенный преобразователь частоты; ТР – тиристорный разрядник; МДП – машина двойного питания; БР – буферный реактор;  $R_{cb}$  – разрядное сопротивление; Т – блочный трансформатор

АСВГ представляет собой машину двойного питания (МДП), к выводам которой подключен двухзвенный преобразователь частоты (ДПЧ), управляющий частотой вращения магнитного поля ротора. АСВГ способен поддерживать синхронный режим работы при различных скоростях вращения турбины. К ротору МДП подключается тиристорный разрядник (ТР), предназначенный для гашения поля ротора в аварийном режиме. При возникновении КЗ в сети для защиты обмоток статора и ротора, а также ДПЧ от повреждения сверхпереходными и переходными токами ТР шунтирует обмотку ротора на разрядное сопротивление  $R_{cb}$  (рис. 1). Также система управления ветроустановкой отключает ДПЧ с двух сторон [1].

Для моделирования различных видов КЗ необходимо рассмотреть схемы замещения АСВГ прямой и обратной последовательности (рис. 2). Схема замещения нулевой последовательности не рассматривается, так как АСВГ подключается к сети через блочный трансформатор со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y$ .

Обмотка статора на схеме замещения прямой (обратной) последовательности представляется сопротивлением:

$$z_{s1,2} = R_s \pm j\omega_s L_{\sigma s},$$

где  $R_s$  – активное сопротивление обмотки статора,  $L_{\sigma s}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора,  $\omega_s$  – частота напряжения статора.

Знак «минус» перед индуктивным сопротивлением рассеяния для обратной последовательности отражает тот факт, что поле обратной последовательности вращается в противоположном направлении (обратное чередование фаз).

Шунтирование обмотки ротора на разрядное сопротивление  $R_{cb}$  позволяет рассматривать АСВГ как асинхронную машину в режиме КЗ [2]. Тогда обмотка ротора и тиристорный разрядник на схеме замещения прямой последовательности могут быть представлены как:

$$\underline{z}_{r1} = j\omega_s L_{\sigma r} + \frac{R_r + R_{cb}}{s},$$

где  $R_r$  – активное сопротивление обмотки ротора,  $L_{\sigma r}$  – индуктивность рассеяния обмотки ротора,  $s$  – скольжение генератора.

На схеме замещения обратной последовательности:

$$\underline{z}_{r2} = -j\omega_s L_{\sigma r} + \frac{R_r + R_{cb}}{2-s}.$$

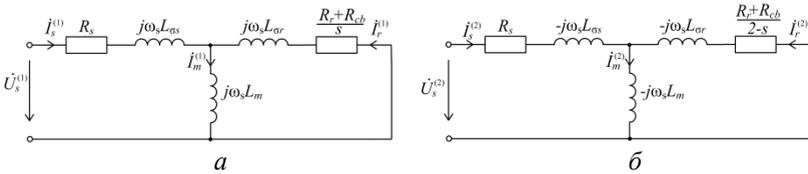


Рис. 2. Схемы замещения АСВГ: *а* – прямой последовательности; *б* – обратной последовательности

Нелинейные эффекты, такие как насыщение магнитопровода, гистерезис и изменение активных сопротивлений обмоток при их нагреве, не учитываются [3].

Все параметры схемы замещения задаются производителем АСВГ и приведены к обмотке статора. Скольжение может быть определено по кривым зависимости частоты вращения ротора АСВГ от скорости ветра.

По схемам замещения рис. 2 легко рассчитываются установившиеся токи АСВГ при различных КЗ в сети.

Для расчета токов КЗ при переходных процессах необходимо проанализировать изменение потокосцеплений статора и ротора генератора.

### Потокоцепление статора АСВГ в аварийном режиме

При анализе переходных процессов в АСВГ напряжение на статоре удобно представить обобщенным вектором [4]:

$$\dot{u}_s = \begin{cases} \dot{u}_s(0-) = \dot{U}_s(0-)e^{j\omega_s t}, & t < 0; \\ \dot{u}_s^{(1)} + \dot{u}_s^{(2)} = \dot{U}_s^{(1)}e^{j\omega_s t} + \dot{U}_s^{(2)}e^{-j\omega_s t}, & t \geq 0, \end{cases}$$

где  $\dot{u}_s(0-)$  – обобщенный вектор напряжения статора в предшествующем режиме;  $\dot{U}_s$  – комплексная амплитуда напряжения статора в предшествующем режиме;  $\dot{u}_s^{(1)}$ ,  $\dot{u}_s^{(2)}$  – обобщенные векторы напряжения статора прямой и обратной последовательности в аварийном режиме;  $\dot{U}_s^{(1)}$ ,  $\dot{U}_s^{(2)}$  – комплексные амплитуды напряжения статора прямой и обратной последовательности аварийном режиме;  $t = 0$  – момент КЗ.

Уравнения напряжений статора и ротора АСВГ в неподвижной относительно статора системе координат могут быть записаны как:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{s,s} &= R_s i_{s,s} + \frac{d\dot{\Psi}_{s,s}}{dt}; \\ \dot{u}_{r,s} &= R_r i_{r,s} + \frac{d\dot{\Psi}_{r,s}}{dt} - j\omega_r \dot{\Psi}_{r,s}; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{u}_s, i_s, \dot{u}_r, i_r$  – напряжение и ток в обмотках статора и ротора, соответственно; потокоцепление статора и ротора:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_s &= L_s i_s + L_m i_r; \\ \dot{\Psi}_r &= L_m i_s + L_r i_r, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_s = L_{\sigma s} + L_m$ ,  $L_r = L_{\sigma r} + L_m$  – полная индуктивность обмотки статора и ротора, соответственно;  $L_m$  – взаимная индуктивность.

Пренебрегая малым по величине активным сопротивлением статора  $R_s$  в системе уравнений (1):

$$\dot{u}_{s,s} = \frac{d\dot{\Psi}_{s,s}}{dt} = \frac{d(\dot{\Psi}_s e^{j\omega_s t})}{dt} = j\omega_s \dot{\Psi}_{s,s},$$

получим потокоцепление статора в предшествующем режиме:

$$\dot{\Psi}_{s,s}(0-) = \frac{\dot{u}_{s,s}(0-)}{j\omega_s} = \frac{\dot{U}_{s,s}(0-)e^{j\omega_s t}}{j\omega_s}. \quad (3)$$

Потокосцепление статора прямой и обратной последовательности при КЗ:

$$\begin{aligned}\dot{\psi}_{s,s}^{(1)}(0+) &= \frac{\dot{u}_{s,s}^{(1)}}{j\omega_s} = \frac{\dot{U}_{s,s}^{(1)} e^{j\omega_s t}}{j\omega_s}; \\ \dot{\psi}_{s,s}^{(2)}(0+) &= \frac{\dot{u}_{s,s}^{(2)}}{-j\omega_s} = \frac{\dot{U}_{s,s}^{(2)} e^{-j\omega_s t}}{-j\omega_s}.\end{aligned}\quad (4)$$

Известно, что потокосцепление статора при КЗ в сети не может измениться скачкообразно, т.е.  $\dot{\psi}_{s,s}(0-) = \dot{\psi}_{s,s}(0+)$  [5]. Следовательно, свободная составляющая потокосцепления статора  $\dot{\psi}_{s_{-a},s}(0+) = \dot{\psi}_{s,s}(0-) - \dot{\psi}_{s,s}^{(1)}(0+) - \dot{\psi}_{s,s}^{(2)}(0+)$ , при этом может быть выражена как:

$$\dot{\psi}_{s_{-a},s}(0+) = \dot{\Psi}_{s_{-a},s} e^{-\frac{t}{T_{s\_DFIG}}} = \frac{\dot{U}_s(0-) - (\dot{U}_s^{(1)} - \dot{U}_s^{(2)})}{j\omega_s} e^{-\frac{t}{T_{s\_DFIG}}}, \quad (5)$$

где  $T_{s\_DFIG} = \frac{L_s^*}{R_s} = \frac{L_s - \frac{j\omega_r L_m^2}{R_r + R_{cb} + j\omega_r L_r}}{R_s}$  – переходная постоянная статора АСВГ [6];  $L_s^*$  – переходная индуктивность статора АСВГ в аварийном режиме.

Полное потокосцепление статора определяется как сумма принужденных и свободной составляющих:

$$\dot{\psi}_{s,s}(0+) = \dot{\psi}_{s,s}^{(1)}(0+) + \dot{\psi}_{s,s}^{(2)}(0+) + \dot{\psi}_{s_{-a},s}(0+),$$

которое с учетом (4) и (5) может быть записано как:

$$\dot{\psi}_{s,s}(0+) = \frac{\dot{U}_s^{(1)} e^{j\omega_s t} - \dot{U}_s^{(2)} e^{-j\omega_s t}}{j\omega_s} + \frac{\dot{U}_s(0-) - (\dot{U}_s^{(1)} - \dot{U}_s^{(2)})}{j\omega_s} e^{-\frac{t}{T_{s\_DFIG}}}. \quad (6)$$

### ***Потокосцепление ротора АСВГ в аварийном режиме***

Подставляя (3) в (2), потокосцепление ротора АСВГ в предшествующем режиме может быть определено как:

$$\dot{\psi}_{r,s}(0-) = \frac{L_m^2 - L_s L_r}{L_m} i_{s,s}(0-) + \frac{L_r}{L_m} \frac{\dot{u}_s(0-)}{j\omega_s}. \quad (7)$$

Из рис. 2 определим составляющие тока ротора прямой и обратной последовательности:

$$i_{r,s}^{(1)} = \frac{-j\omega_s L_m}{j\omega_s L_r + \frac{R_r + R_{cb}}{s}} i_{s,s}^{(1)}, \quad (8)$$

$$i_{r,s}^{(2)} = \frac{j\omega_s L_m}{-j\omega_s L_r + \frac{R_r + R_{cb}}{2-s}} i_{s,s}^{(2)}.$$

Подставляя (8) в (2) и пренебрегая малым активным сопротивлением статора  $R_s$ , получим принужденные составляющие потокосцепления ротора прямой и обратной последовательностей в режиме КЗ:

$$\dot{\Psi}_{r,s}^{(1)}(0+) = \left( L_m - \frac{j\omega_s L_m L_r}{j\omega_s L_r + \frac{R_r + R_{cb}}{s}} \right) \frac{\dot{U}_s^{(1)} e^{j\omega_s t}}{\underline{Z}_1}; \quad (9)$$

$$\dot{\Psi}_{r,s}^{(2)}(0+) = \left( L_m + \frac{j\omega_s L_m L_r}{-j\omega_s L_r + \frac{R_r + R_{cb}}{2-s}} \right) \frac{\dot{U}_s^{(2)} e^{-j\omega_s t}}{\underline{Z}_2}.$$

где  $\underline{Z}_1 = \left( j\omega_s L_{\sigma r} + \frac{R_r + R_{cb}}{s} \right) \parallel j\omega_s L_m + j\omega_s L_{\sigma s}$  – эквивалентное сопротивление прямой последовательности;

$\underline{Z}_2 = \left( -j\omega_s L_{\sigma r} + \frac{R_r + R_{cb}}{2-s} \right) \parallel (-j\omega_s L_m) - j\omega_s L_{\sigma s}$  – эквивалентное сопротивление обратной последовательности.

Свободная составляющая потокосцепления статора с учетом (5), сцепленная с обмотками ротора, в неподвижной относительно ротора системе координат будет изменяться по следующему закону:

$$\dot{\Psi}_{s_{a,r}}(0+) = k_s \dot{\Psi}_{s_{a,s}} e^{-\frac{t}{T_{s\_DFIG}}} e^{-j\omega_r t}, \quad (10)$$

где  $k_s = \frac{L_m}{L_s}$  – коэффициент электромагнитной связи статора.

Учитывая, что составляющая  $e^{-\frac{t}{T_{s\_DFIG}}}$  затухает медленно (постоянная затухания гораздо больше  $\frac{2\pi}{\omega_r}$ ), затуханием потокосце-

пления статора  $\dot{\psi}_{s-a,r}$  во время существования КЗ можно пренебречь. В этом случае ЭДС, индуцируемая  $\dot{\psi}_{s-a,r}$  в обмотках ротора:

$$\dot{e}_r = -k_s \frac{d(\dot{\psi}_{s-a,s} e^{-j\omega_r t})}{dt} = j\omega_r k_s \dot{\psi}_{s-a,s} e^{-j\omega_r t}.$$

Ток, возникающий в цепи ротора под действием этой ЭДС (с учетом положительного направления токов и напряжений, принятых в системе (1)):

$$i_{ac,r} = \frac{-j\omega_r k_s \dot{\psi}_{s-a,s} e^{-j\omega_r t}}{R_r + R_{cb} + j\omega_r L'_r}, \quad (11)$$

где  $L'_r = \frac{L_m^2 - L_s L_r}{-L_s}$  – переходная индуктивность ротора.

Тогда с учетом (10) и (11) суммарный поток ротора, вызванный свободной составляющей потокосцепления статора:

$$\dot{\psi}_{s-r,r}(0+) = \dot{\psi}_{s-a,r}(0+) + L'_r i_{ac,r} = \left(1 - \frac{j\omega_r L'_r}{R_r + R_{cb} + j\omega_r L'_r}\right) k_s \dot{\psi}_{s-a,s} e^{-j\omega_r t}. \quad (12)$$

Из уравнений (7), (9) и (12) получим значения принужденных составляющих потокосцеплений в предшествующем режиме (0-) и в начальный момент КЗ (0+):

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_r(0-) &= \frac{L_m^2 - L_s L_r}{L_m} \dot{I}_s(0-) + \frac{L_r}{L_m} \frac{\dot{U}_s(0-)}{j\omega_s}; \\ \dot{\Psi}_r^{(1)}(0+) &= \frac{L_m \frac{R_r + R_{cb}}{s} \dot{U}_s^{(1)}}{\omega_s^2 (L_m^2 - L_s L_r) + j\omega_s L_s \frac{R_r + R_{cb}}{s}}; \\ \dot{\Psi}_r^{(2)}(0+) &= \frac{L_m \frac{R_r + R_{cb}}{2-s} \dot{U}_s^{(2)}}{\omega_s^2 (L_m^2 - L_s L_r) - j\omega_s L_s \frac{R_r + R_{cb}}{2-s}}; \\ \dot{\Psi}_{s-r}(0+) &= \frac{k_s L_s \frac{R_r + R_{cb}}{s-1} [\dot{U}_s(0-) - (\dot{U}_s^{(1)} - \dot{U}_s^{(2)})]}{\omega_s^2 (L_m^2 - L_s L_r) + j\omega_s L_s \frac{R_r + R_{cb}}{s-1}}. \end{aligned}$$

Свободная составляющая потокосцепления ротора:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_{r_{-a,r}}(0+) &= \left[ \dot{\Psi}_r(0-) - \left( \dot{\Psi}_r^{(1)}(0+) + \dot{\Psi}_r^{(2)}(0+) + \dot{\Psi}_{s_{-r}}(0+) \right) \right] e^{-\frac{t}{T_{r\_DFIG}}} = \\ &= A e^{-\frac{t}{T_{r\_DFIG}}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $T_{r\_DFIG} = \frac{L'_r}{R_r + R_{cb}}$  – переходная постоянная времени ротора АСВГ.

Тогда полное потокосцепление ротора, выраженное в неподвижной относительно статора системе координат может быть определено через выражение:

$$\dot{\Psi}_{r,s}(0+) = \dot{\Psi}_{r,s}^{(1)}(0+) + \dot{\Psi}_{r,s}^{(2)}(0+) + \left( \dot{\Psi}_{s_{-r,r}}(0+) + \dot{\Psi}_{r_{-a,r}}(0+) \right) e^{j\omega_r t}. \quad (14)$$

### ***Токи статора и ротора АСВГ в аварийном режиме***

Из уравнений (2) выразим токи статора и ротора:

$$\begin{aligned} i_s &= \frac{-L_r}{L_m^2 - L_s L_r} \dot{\Psi}_s + \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \dot{\Psi}_r; \\ i_r &= \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \dot{\Psi}_s - \frac{L_s}{L_m^2 - L_s L_r} \dot{\Psi}_r \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя (6) и (14) в (15) можно получить аналитические выражения для определения токов КЗ АСВГ. При этом напряжения  $\dot{U}_s^{(1)}$  и  $\dot{U}_s^{(2)}$  могут быть определены с использованием схем замещения АСВГ рис. 2.

### ***Заключение***

В работе представлены математическая модель АСВГ ВЭС, а также методика расчета токов КЗ в переходных режимах. Результаты исследования могут быть использованы при анализе устойчивости функционирования устройств РЗА, выборе коммутационного оборудования ВЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Xu, F. Blaabjerg, W. Cheen, N. Zhu. Advanced Control of Doubly Fed Induction Generation for Wind Power System. Wiley, IEEE Press, 2018, 463 p.

2. J. Zhang, B. Zhang, Z. Hao. Equivalent Circuit of DFIG with Crowbar Protection for Relay Protection Analysis. 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), 2016.

3. ГОСТ 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.

4. Q. Tu, Y. Li, M. Huang, S. Jiao. Short-circuit Sequence Network Model of DFIG with Different Slips. IEEE Power and Energy society General Meeting (PESGM), Aug. 2018.

5. Z. Zheng, G. Yang, H. Geng. Short Circuit Current Analysis of DFIG-type WG with Crowbar Protection under Grid Faults. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing, China, 2012.

6. F. Sulla. Fault Behavior of Wind Turbines. Doctoral Dissertation Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering, Lund University, Sweden, 2012.

**Авторы:**

**Фёдоров Алексей Олегович**, Окончил в 2018 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень бакалавра по направлению «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Инженер департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», магистрант ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». E-mail: fedorov\_a@ekra.ru.

**Солдатов Александр Вячеславович**, окончил в 2006 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Заместитель директора департамента автоматизации энергосистем по научному сопровождению продукции ООО НПП «ЭКРА». E-mail: soldatov\_av@ekra.ru.

**Петров Владимир Сергеевич**, Окончил в 2010 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». Руководитель группы научного сопровождения внешних НИОКР департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. E-mail: petrov\_vs@ekra.ru.