

# Стабилизация выходной мощности и увеличение КПД ветрогенераторных установок средствами системы управления

А. А. Чепига

Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
Москва, Россия  
andreichepiga@gmail.com

Ю. Али

Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
Москва, Россия  
joseph86.ali@gmail.com

Е. Е. Корытченкова

Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»  
Москва, Россия  
e.e.korytchenkova@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе представлен алгоритм компенсации теневого эффекта ветроустановки с синхронным генератором с постоянными магнитами. Метод основан на принципах векторного регулирования и обеспечивает компенсацию колебаний мощности ветрового потока, что, соответственно, позволяет снизить уровень колебаний активной мощности генератора. В методе используется алгоритм настройки контуров тока, скорости и регулирования поворота лопасти ветрогенератора, позволяющие решить проблему эффекта затенения башни. Полученные с помощью предложенного метода данные могут быть использованы для эффективного моделирования работающих параллельно с сетью ветроустановок и оптимизации их параметров.

**Ключевые слова:** ветроустановка, синхронный генератор с постоянными магнитами, векторное регулирование, активная мощность, контур тока, контур скорости, контур регулирования поворота лопасти, эффект затенения башни

## I. ВВЕДЕНИЕ

С увеличением количества ветровых станций и их установленной мощности возникает ряд вопросов, требующих дополнительных исследований. Так, при параллельной работе ветроэлектростанций с энергосистемой в ряде случаев не обеспечивается качество напряжения из-за колебаний мощности, выдаваемой в сеть [1]. Причиной этого может быть как нестабильность скорости ветра, так и конструктивные особенности ветроустановок [2]. Актуальным решением этой задачи является совершенствование системы регулирования и разработка методов математического моделирования режимов работы ветроэнергетических установок.

В ветроэнергетических системах используются различные типы машин. Наиболее распространенным из них, используемым в ветрогенераторах, является синхронный генератор с постоянными магнитами, поскольку он обеспечивает хорошую производительность в широком диапазоне скоростей.

В данной статье на базе синхронного генератора с постоянными магнитами описан синтез регулирования ветрогенераторной установки с учетом эффекта

затенения и спектральной модели ветра Ван дер Ховена, которая способна обеспечивать режим стабилизации мощности путем использования принципов векторного регулирования.

## II. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

Перед началом анализа динамических свойств системы регулирования следует проанализировать природу колебаний мощности ветроколеса, которые вызываются как свойствами ветрового потока, так и конструктивными особенностями ветроустановок. В изученных работах [3] показано, что поведение скорости ветрового потока может быть описано как сумма низкочастотной и турбулентной компонент согласно спектральной модели Ван дер Ховена по следующей формуле:

$$v(t) = v_s(t) + v_t(t) \quad (1)$$

где  $v_s$  – низкочастотная компонента;  $v_t$  – высокочастотная (турбулентная) компонента скорости ветра.

Периодические изменения приводного момента ветроколеса, вызванные эффектом затенения башни, также можно воспринимать как последствия колебаний скорости ветра, хотя причина этих колебаний не в природе ветра, а в особенностях конструкции ветроустановки. Именно благодаря особенностям конструкции, лопасти ветроколеса по очереди пересекают зону затенения трубчатой башни, оказываясь в безветренной зоне. Это и приводит к колебаниям момента ветроколеса на частоте  $1 \div 2$  Гц, в зависимости от скорости его вращения. Следует отметить, что такая частота значительно усиливает воздействие возмущающего фактора на систему регулирования.

Для обеспечения компенсации колебаний мощности ветрового потока необходимо использовать быстродействующую систему регулирования, потому что механическая система регулировки pitch-угла не в состоянии обеспечить качественную стабилизацию выходной мощности [4].

Для решения этой задачи целесообразно использовать быстродействующую систему векторного регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 1.

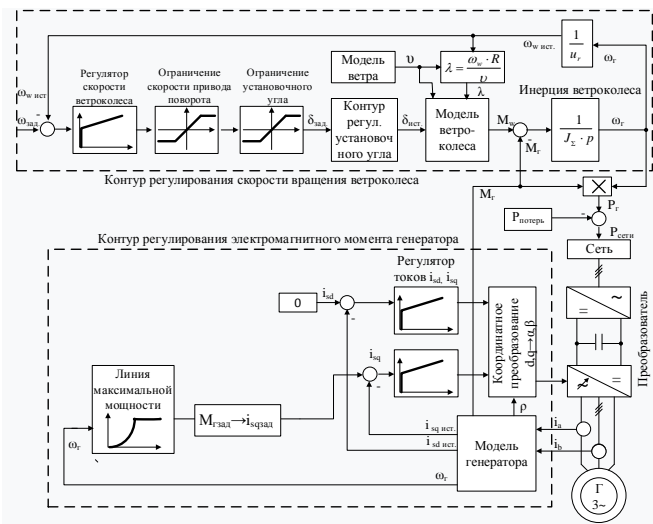


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы стабилизации активной мощности ветроустановки

Приведенная система регулирования может применяться для ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса, что обеспечивается за счет использования преобразователя частоты. В этой системе задача регулирования скорости вращения ветроколеса и момента генератора разделена между двумя контурами.

Регулирование скорости вращения ветроколеса осуществляется за счет изменения pitch-угла. Регулирование момента осуществляется во вращающейся системе координат d-q, вещественная ось d которой связана с вектором потока ротора. Необходимые обратные связи в системе регулирования обеспечиваются моделью генератора, которая базируется на уравнениях статора и ротора синхронной машины, записанных для вращающейся системы координат [5].

Ввиду малого значения постоянной времени современных преобразователей частоты, работающих с высокими частотами модуляции до 20 кГц, контур регулирования моментобразующей компоненты тока статора имеет большое быстродействие, которое является достаточным для компенсации колебаний возмущающего воздействия.

Передаточная функция и значение коэффициентов регулятора скорости вращения ветроколеса определяются согласно симметричному оптимуму:

$$\begin{cases} G_{\omega R}(p) = \frac{T_{reg} \cdot p + 1}{T_{\omega 0} \cdot p}; \\ T_{reg} = 4.25 \cdot T_s; \\ T_{\omega 0} = \frac{8.5 \cdot T_s^2 \cdot k_{ws}}{J}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_s$  – постоянная времени статора;  $J$  – момент инерции генератора;  $k_{ws}$  – коэффициент передачи модели ветроколеса, который связывает значение установочного угла лопасти со значением момента ветроколеса, причем значение этого коэффициента должно постоянно определяться системой по причине нелинейной зависимости коэффициента мощности ветроколеса –  $c_{pw}$  от pitch-угла.

После применения коэффициентов регулятора согласно формуле (2) можно получить значения

передаточной функции замкнутого контура регулирования скорости вращения ветроколеса по отношению к возмущающему воздействию, которым являются колебания момента ветроколеса, обусловленные колебаниями скорости ветра. Этот контур представляет собой звено 3-го порядка, но после упрощения его передаточная функция приобретает вид:

$$G_n(p) \approx \frac{1}{J} \cdot \frac{8.5 \cdot T_s^2 \cdot p}{4.25 \cdot T_s \cdot p + 1} \quad (3)$$

При условии допущения, что сигнал возмущающего влияния изменяется по закону, близкому к синусоидальному, с частотой колебаний, обусловленных эффектом затенения башни, на основе передаточной функции (3) можно составить дифференциальное уравнение, которое будет связывать скорость вращения ветроколеса –  $\omega_w$  с амплитудой  $A$  и частотой колебаний  $\omega_k$  возмущающего воздействия:

$$\frac{d\omega_w(t)}{dt} + \frac{1}{4.25 \cdot T_s} \cdot \omega_w(t) = \frac{2 \cdot A \cdot \omega_k \cdot T_s}{J} \cdot \cos(\omega_k \cdot t) \quad (4)$$

Решив данное уравнение (4) относительно скорости вращения ветроколеса –  $\omega(t)$ , получим выражение:

$$\omega_w(t) = \frac{2A\omega_k T_s}{J} \cdot \left( \frac{\frac{1}{4.25T_s} \cos(\omega_k t) + \omega_k \sin(\omega_k t)}{\left(\frac{1}{4.25T_s}\right)^2 + \omega_k^2} \right) \quad (5)$$

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Амплитуда колебаний возмущающего воздействия, вызванных эффектом затенения башни, может достигать величины порядка 15% от значения номинального момента ветроколеса при снижениях скорости ветра в секторе затенения в 2 раза. Следовательно, при частоте колебаний возмущения –  $f_k \approx 1$  Гц, постоянной времени контура скорости поворота лопасти –  $T_s = 0.025$  с и суммарном моменте инерции ветроколеса –  $J = 1468$  кг·м<sup>2</sup> на основании формулы (5) можно оценить амплитуду колебаний скорости вращения генератора, которая будет равняться примерно 0,3% от его номинальной скорости. При указанном уровне амплитуды колебаний скорости вращения – 0,3%, амплитуда колебаний активной мощности не превысит значения 1%.

Результаты моделирования процесса стабилизации мощности генератора при колебаниях скорости ветра в программном пакете MATLAB продемонстрированы на рис. 2.

На данном графике видно, что в режиме частичной нагрузки мощность генератора по среднему значению ( $P_{ген}$ ) пытается повторить поведение мощности ветрового потока ( $P_{потока}$ ), при этом ветроколесо работает с максимальным расчетным коэффициентом мощности. В режиме полной нагрузки, то есть после достижения скорости вращения генератора своего номинального значения, активная мощность генератора становится меньше, чем мощность ветрового потока, включается контур регулирования поворота лопасти, и значения мощности и скорости генератора ограничиваются на уровне номинала, что выполняется благодаря

регулированию угла поворота лопасти  $\delta$ , который в режиме частичной нагрузке был равным нулю.

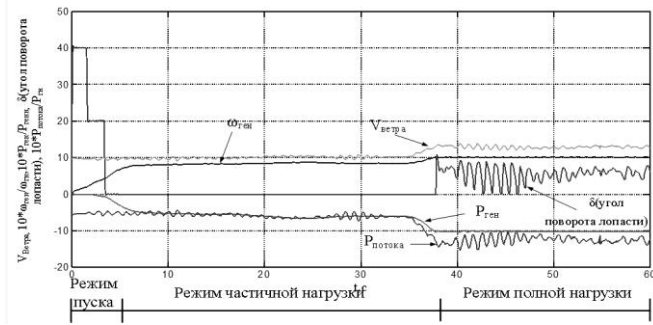


Рис. 2. Поведение ветрогенераторной установки в основных режимах работы (активная мощность генератора  $P_{ген}$ , мощность ветрового потока  $P_{поток}$ , скорость вращения генератора  $\omega_{ген}$ , скорость ветра  $V_{ветра}$ , угол поворота лопасти  $\delta$ )

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование двухконтурной системы стабилизации мощности ветроустановки, в которой функции регулирования скорости вращения ветроколеса и момента генератора распределены между системой pitch-регулирования и системой векторного регулирования соответственно, позволяет снизить уровень колебаний активной мощности генератора, обусловленных в большей степени эффектом затенения башни, примерно на порядок по сравнению с концепцией прямого

подключения синхронного генератора к сети, что, безусловно, положительно сказывается на качестве сетевого напряжения с точки зрения соответствия его международным требованиям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] C. Lumbreras, J. M. Guerrero, D. Fernandez, D. Diaz, C. Gonzalez, F. Briz, "Analysis and Control of the Inductorless Boost Rectifier for Small Power Wind Energy Converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 689 – 700, Jan.-Feb. 2019.2017 Key World Energy Statistics (PDF). Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/> 30. IEA (2017). Accessed: 7 february 2018.
- [2] A. Lebioda, K. Rudion, A. Orths, Z. Styczynski, "Investigation of disposable reserve power in a large-scale wind farm," 2005 IEEE Russia Power Tech, 27-30 June 2005.
- [3] E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, X. Wang, C.L. Bak, "Reducing Harmonic Instability and Resonance Problems in PMSG-Based Wind Farms," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, pp. 73–83, March 2018.
- [4] G. Rigatos, N. Zervos, D. Serpanos, V. Siadimas, P. Siano, M. Abbaszadeh, "Condition Monitoring of Wind-Power Units Using the H-Infinity Kalman Filter," 2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 18-20 March 2019.
- [5] N. Bianchi, A. Lorenzoni, "Permanent magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators," International Conference on Opportunities and Advances in International Power Generation, 18-20 March 1996.