

УДК 621.658.018.531

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**у. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ
МОЩНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Предложено математическое описание ветроэлектрической станции постоянного напряжения для моделирования стабилизации мощности, передаваемой в сеть, как в стационарном, так и в динамическом, импульсном режиме. Отличительной чертой является возможность управления механическими и электрическими средствами, что повышает качество стабилизации.

Ключевые слова: математическое моделирование, стабилизация мощности, ветроэлектростанция постоянного напряжения, угол установки лопастей, сопротивление возбуждения.

Введение. Закон Украины «Об энергосбережении» и «Национальная энергетическая программа» определяют ветроэнергетику, как приоритетное направление в комплексе развития нетрадиционных источников электроэнергии, поэтому применение ветроэлектрических станций (ВЭС) – актуальная задача. Главными составляющими элементами ВЭС являются ветроколесо и приводимый им во вращение генератор. Изменение скорости ветра влияет на скорость вращения генератора, что приводит к изменению вырабатываемой мощности. Ветроколесо снабжено лопастями, которые могут устанавливаться на определенный угол к плоскости колеса, при этом изменяется вращающий момент, и это является одним из способов регулирования мощности. Генератор подсоединен к энергосистеме с неизменным напряжением, поэтому у ВЭС нет определенной нагрузки, а вся вырабатываемая энергия идет в общую сеть. Управление ВЭС должно быть направлено на обеспечение передачи стабильной мощности в энергосистему при изменяющейся скорости ветра. Слишком большая вырабатываемая мощность при большой скорости ветра приводит к перегрузке генератора, слишком малая – к недостаточно эффективному его использованию.

Существующие работы по ВЭС [1–3] в основном направлены на расчет и проектирование конструкций электрических генераторов и механических элементов ВЭС. Уделяется недостаточно внимания исследованию динамических свойств ВЭС и получению стабильной мощности при изменении скорости ветра. Большинство работ направлено на исследование мощных ВЭС переменного тока. В работах [2, 3] управление мощной ВЭС переменного тока осуществляется путем изменения угла установки лопастей ветроколеса, управление посредством генератора не исследуется. В [4] выполнена оптимизация режима автономной ВЭС постоянного тока, работающей на индивидуальную нагрузку. Для получения максимальной мощности предлагается регулирование генератора, механическое регулирование не производится.

В настоящее время существует необходимость в исследовании процессов стабилизации мощности ВЭС постоянного тока, работающей на сеть. Управление должно использовать как механические, так и электрические средства.

Цель работы. Целью статьи является математическое описание и моделирование системы стабилизации мощности ВЭС постоянного тока малой мощности, работающей на локальную сеть с неизменным напряжением в условиях изменения скорости ветра.

Математическая модель ВЭС. Ветроколесо создает момент, вращающий генератор. Этот момент зависит от скорости ветра V , угловой скорости вращения Ω ветроколеса, его диаметра D и угла установки лопастей α [1]

$$M_{BK}(\Omega, V, \alpha) = M_0(z, \alpha) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}, \quad (1)$$

где $z = \frac{D\Omega}{2V}$ – коэффициент быстроходности; $M_0(z, \alpha)$ – удельный момент; $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха. Зависимость $M_0(z, \alpha)$ не имеет аналитического вида и задается численно. На рисунке 1 изображены графики зависимости $M_{BK}(\Omega, V, \alpha)$ по (1) для трехлопастного ветроколеса с горизонтальной осью вращения от угла α при различных скоростях ветра V и от угловой скорости Ω при различных углах α . Рисунок показывает, что вращающий момент ветроколеса имеет характерный максимум, зависящий как от скорости вращения, так и от угла установки лопастей.

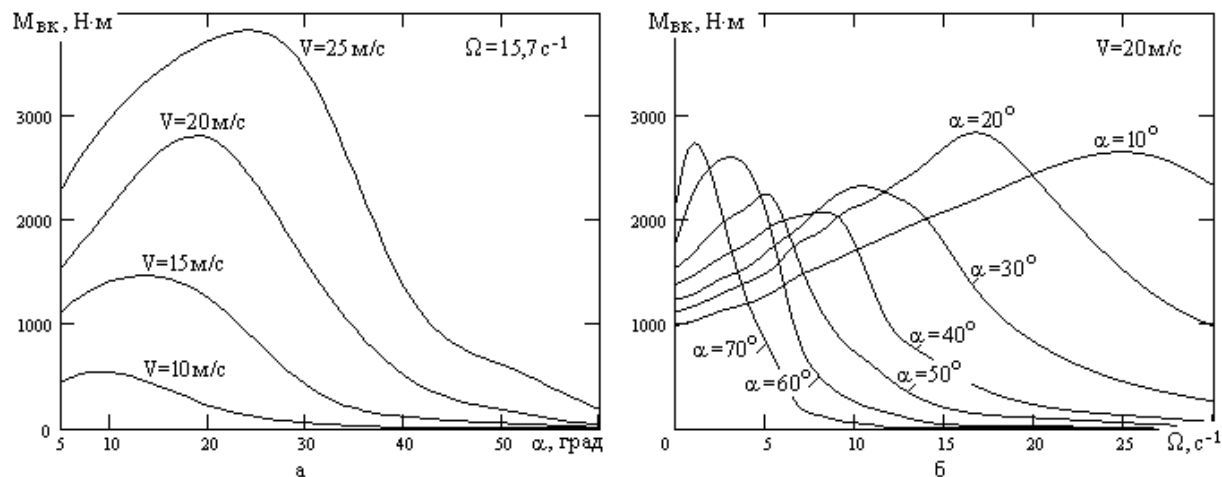


Рисунок 1 – Вращающий момент ветроколеса:
а) зависимость от угла установки лопастей; б) зависимость от угловой скорости

Упрощенная схема генератора постоянного тока с параллельным возбуждением изображена на рисунке 2. Выход генератора подсоединен к сети постоянного напряжения U . Вырабатываемый ток i_a ответвляется в обмотку возбуждения i_e и идет в сеть i . ЭДС генератора определяется произведением $e = \Omega \Phi$, где Φ – магнитный поток обмотки возбуждения. Зависимость потока от тока возбуждения нелинейна вследствие насыщения магнитной цепи и изображена справа на рисунке 2. Для целей исследования эта зависимость аппроксимируется выражением

$$\Phi(i_e) = a \cdot \arctg(bi_e) + ci_e. \quad (2)$$

где значения $a = 11,8$; $b = 1$; $c = 0,1$ – типичные коэффициенты аппроксимации для генераторов небольшой мощности. Электромагнитный момент генератора определяется произведением $M_G = \Phi i_a$.

Из уравнения для контура генератора получаем $e = R_a i_a + U$, откуда $i_a = \frac{e - U}{R_a}$.

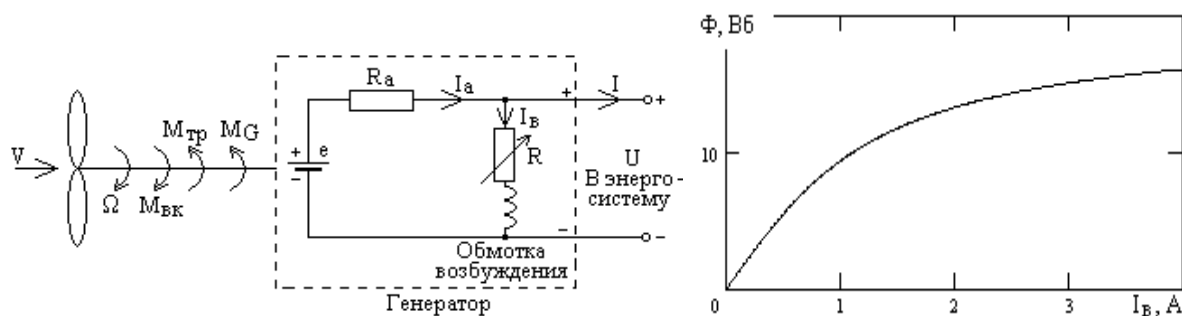


Рисунок 2 – Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением

Уравнение равновесия механических моментов имеет вид

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{TP} \Omega + \Phi(i_e) \frac{\Omega \Phi(i_e) - U}{R_a} = M_{BK}(\Omega, V, \alpha). \quad (3)$$

где $J \frac{d\Omega}{dt}$ – динамический момент; J – момент инерции вращающихся масс; $k_{TP} \Omega$ – момент трения; k_{TP} – коэффициент трения.

Напряжение сети, приложенное к обмотке возбуждения, уравновешивается падением напряжения на сопротивлении обмотки R_i и напряжением самоиндукции $\frac{d\Phi}{dt}$. Уравнение баланса напряжений имеет вид

$$\frac{d\Phi}{di_e} \frac{di_e}{dt} + R_i i_e = U. \quad (4)$$

Поворот лопастей ветроколеса на угол α осуществляется вспомогательным электроприводом, на вход которого подается напряжение u_α . Скорость изменения угла установки лопастей $\frac{d\alpha}{dt}$ пропорциональна этому напряжению, т.е.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_\alpha u_\alpha. \quad (5)$$

Мощность P_G , передаваемая генератором в сеть, определяется произведением $P_G = Ui$. Так как $i = i_a - i_g$, получаем

$$P_G = U \cdot \left(\frac{\Omega \Phi(i_g) - U}{R_a} - i_g \right). \quad (6)$$

Генератор должен отдавать в сеть стабильную мощность $P_G = P_c$ по (6) при произвольном характере изменения скорости ветра $V(t)$, причем напряжение в сети U поддерживается системой на постоянном уровне.

Уравнения (2) – (6) определяют упрощенное математическое описание ВЭС небольшой мощности. В этих уравнениях $V(t)$ – независимое возмущение; u_α – управляющее воздействие для механического регулирования ВЭС; переменное сопротивление R в цепи возбуждения – управляющее воздействие для электрического регулирования.

Моделирование статического режима. Статический режим на основании (3), (4) описывается уравнением

$$k_{TP} \Omega + \Phi(i_g) \frac{\Omega \Phi(i_g) - U}{R_a} = M_{BK}(\Omega, V, \alpha), \quad (7)$$

где $i_g = \frac{U}{R}$. Совместное решение (6), (7) дает значение скорости вращения Ω и сопротивления R для обеспечения требуемой мощности P_c при известном значении скорости ветра V и при установленном угле поворота лопастей α . Графики зависимости R от V для различных α изображены на рисунке 3 при $P_c = 5$ кВт; $U = 220$ В и типичных значениях $D = 6$ м; $R_a = 0,9$ Ом; $k_{TP} = 0,5$. Рисунок показывает неоднозначность решения уравнений (6), (7) относительно R . Кроме того, по мере установки все большего угла графики смещаются вправо, так как для поддержания требуемой мощности требуется большая скорость ветра.

При изменении скорости ветра и неизменном угле установки лопастей рабочая точка ВЭС должна перемещаться по одному из графиков, определяя сопротивление R , необходимое для обеспечения требуемой мощности. Точки перегиба графиков определяют минимально необходимую скорость ветра для установленного угла. Технологически допустимые значения сопротивления R находятся в диапазоне от 50 до 700 Ом. Как следует из (6), регулирование мощности изменением сопротивления сопровождается увеличением скорости вращения Ω при увеличении сопротивления.

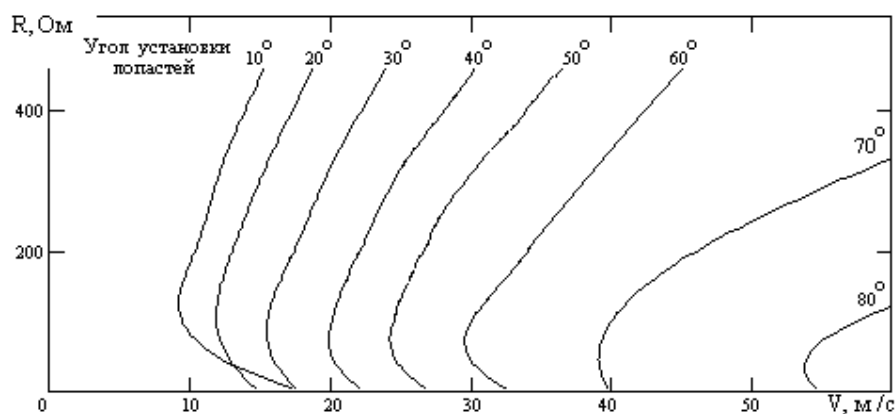


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления возбуждения от скорости ветра и угла

Совместное решение (6), (7) для обеспечения требуемой мощности P_c при известном значении скорости ветра V и при установленном сопротивлении R дает значение скорости вращения Ω и угла

установки лопастей α . Графики зависимости α от V для различных R изображены на рисунке 4 при тех же численных значениях параметров, что и на рисунке 4. Решение для α также неоднозначно. С ростом сопротивления R графики смещаются вправо, т.е. при увеличении R для обеспечения требуемой мощности необходима большая скорость ветра.

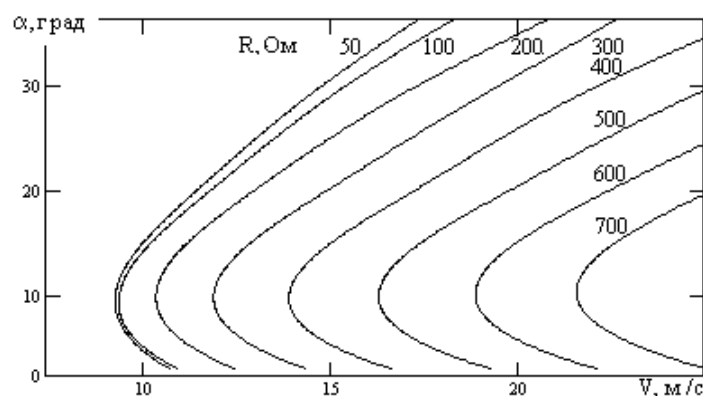


Рисунок 4 – Зависимость угла установки лопастей от скорости ветра

При изменении скорости ветра и неизменном сопротивлении рабочая точка ВЭС должна перемещаться по одному из графиков, определяя значение угла установки лопастей, необходимое для обеспечения требуемой мощности. Точки перегиба графиков определяют минимально необходимую скорость ветра для установленного сопротивления. Технологически допустимые значения угла находятся в диапазоне от 3° до 75° . Регулирование мощности изменением угла не сопровождается изменением скорости вращения Ω , поэтому более предпочтительно.

Совместное решение (6), (7) для обеспечения требуемой мощности P_c при заданных значениях угла α и сопротивления R дает значение скорости вращения Ω и скорости ветра V . Полученные значения V определяют в пространстве α, R, V поверхность равной мощности P_c . Для $P_c = 5$ кВт эта поверхность изображена на рисунке 5,а, а на рисунке 5,б показаны ее линии уровня. Наинизшая точка поверхности соответствует той минимальной скорости ветра, которая еще обеспечивает требуемую мощность. С изменением скорости ветра рабочая точка ВЭС перемещается по поверхности при соответствующем изменении α и R .

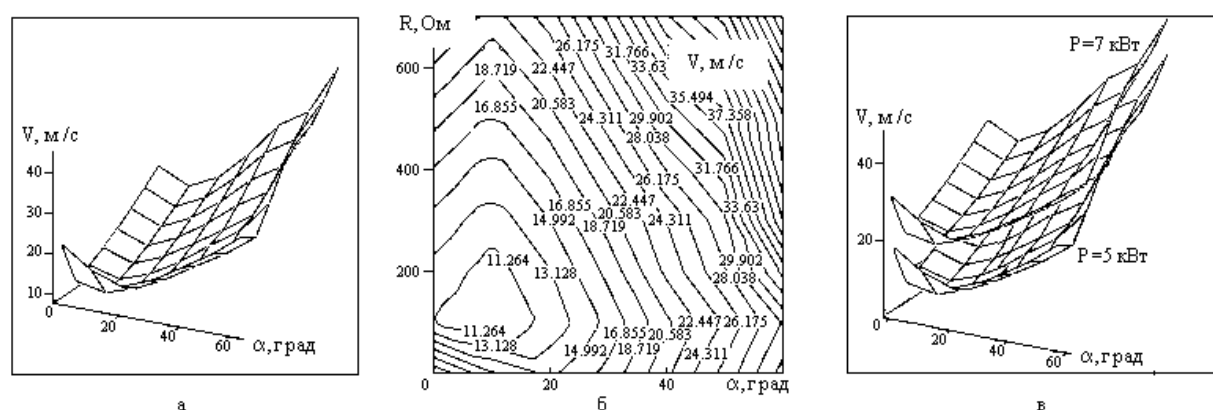


Рисунок 5 – Поверхности равной мощности:

- а) поверхность мощности 5 кВт; б) линии уровня скорости ветра для поверхности 5 кВт;
в) взаимное расположение поверхностей равной мощности 5 кВт и 7 кВт

Для обеспечения большей мощности при неизменных α и R необходима большая скорость ветра. На рисунке 5,в изображены в неизменном масштабе две поверхности, соответствующие мощностям 5 кВт и 7 кВт, т.е. образуется совокупность вложенных друг в друга поверхностей равной мощности. При отсутствии регулирования рабочая точка переходит по вертикальной линии с одной поверхности на другую. Если регулированием α и R рабочая точка достигла низшего уровня поверхности требуемой мощности, при дальнейшем снижении скорости ветра возможности регулирования уже не позволяют удерживать точку на этой поверхности, и она проваливается вниз, что соответствует уменьшению вырабатываемой мощности.

Для установления количественных соотношений линеаризуем уравнения (6), (7), вводя малые отклонения переменных: $\Omega + d\Omega$, $i_g + di_g$, $\alpha + d\alpha$, $P + dP$, $V + dV$, $R + dR$ и производные:

$$M'_\Omega = \frac{\partial M_{BK}}{\partial \Omega}, \quad M'_\alpha = \frac{\partial M_{BK}}{\partial \alpha}, \quad M'_V = \frac{\partial M_{BK}}{\partial V}, \quad \Phi'_{i_g} = \frac{\partial \Phi}{\partial i_g} = \frac{ab}{1 + (bi_g)^2} + c.$$

Опуская величины второго порядка малости, получаем уравнения для малых локальных отклонений переменных

$$k_p dP + k_R dR = M'_V dV + M'_\alpha d\alpha, \quad (8)$$

$$\text{где } k_p = \frac{R_a}{U\Phi} \left(k_{TP} + \frac{\Phi^2}{R_a} - M'_\alpha \right); \quad k_R = \left(\frac{k_p \cdot (\Omega \Phi'_{i_g} - R_a)}{U\Phi} \right) - \frac{U\Phi'_{i_g}}{R^2 R_a} \cdot (2\Phi\Omega - U).$$

Стабилизация мощности в рабочей точке осуществляется при $dP = 0$. Если скорость ветра изменяется до величины $V + dV$, изображающая точка из невозмущенного положения на линии уровня скорости V должна переместиться на линию уровня скорости $V + dV$. Этот переход может быть осуществлен при $d\alpha = 0$ или $dR = 0$. Определим здесь направление одновременного отклонения управляющих переменных $d\alpha$ и dR для стабилизации мощности из условия ортогональности к касательной линии уровня скорости V в невозмущенной точке, рисунок 5,б

$$dR = \frac{k_R M'_V}{k_R^2 + (M'_\alpha)^2} dV; \quad d\alpha = -\frac{M'_\alpha M'_V}{k_R^2 + (M'_\alpha)^2} dV. \quad (9)$$

Производные и k_R в формулах (9) вычисляются в невозмущенной точке.

Таким образом, при сравнительно медленном изменении скорости ветра и при малой инерционности ВЭС стабилизация мощности осуществляется одновременным изменением угла установки лопастей и сопротивления в цепи обмотки возбуждения. На рисунке 6 изображен процесс стабилизации мощности $P_c = 5$ кВт, рассчитанный по выражениям (9) из начального состояния $\alpha = 32^\circ$, $R = 100$ Ом, $V = 17$ м/с, $\Omega = 17$ с⁻¹. Для наглядности график мощности изображен увеличенным в 10 раз, а графики момента и сопротивления – уменьшенными соответственно в 10 и 4 раза. Из рисунка следует, что стабилизация мощности выполняется, определяющую роль здесь играет угол установки лопастей; сопротивление R и скорость вращения Ω изменяются в меньшей степени.

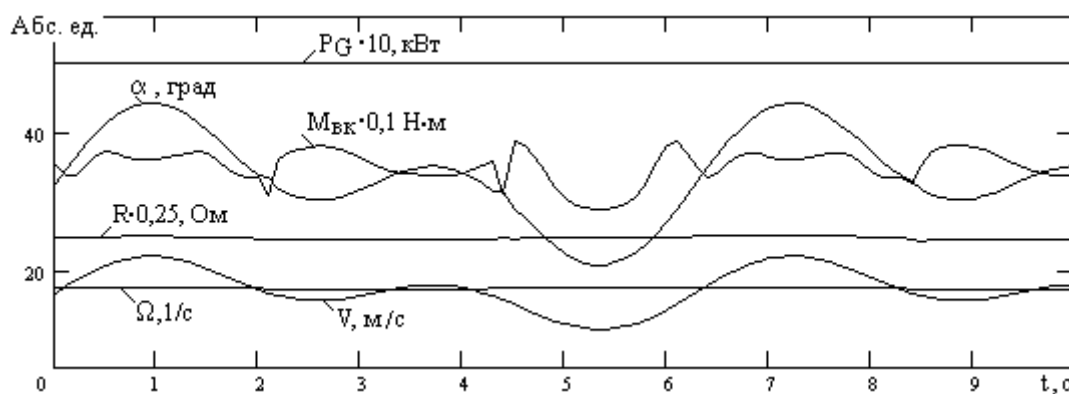


Рисунок 6 – Процесс стабилизации мощности

Моделирование динамического режима. Стабилизацию мощности в динамическом режиме с учетом инерционности ветроколеса и генератора следует осуществлять по отклонению текущего значения мощности от уровня P_c по уравнениям (2) – (6): $dP(t) = P(t) - P_c$. Оценим из (8) отклонение $d\alpha$, необходимое для компенсации отклонения мощности dP при $dV = 0$ и $dR = 0$ и отклонение dR – для компенсации dP при $dV = 0$ и $d\alpha = 0$

$$d\alpha = \frac{k_p}{M'_\alpha} dP, \quad dR = \frac{k_p}{k_R} dP. \quad (10)$$

В этих формулах k_p , k_R и M'_α должны вычисляться с текущими значениями переменных, и должно быть предусмотрено корректное вычисление при $M'_\alpha = 0$ и $k_R = 0$.

Уравнения (4), (5) в этих условиях принимают вид

$$\frac{d\Phi}{di_s} \frac{di_s}{dt} + (R_0 - k_0 \frac{k_p}{k_R} dP) \cdot i_s = U, \quad (11)$$

где R_0 – среднее, номинальное значение сопротивления R ;

$$\frac{d\alpha}{dt} = -k_\alpha \frac{k_p}{M'_\alpha} dP. \quad (12)$$

В формулах (11), (12) положительные весовые коэффициенты k_0 и k_α выбираются, исходя из требуемой точности стабилизации мощности. Очевидно, стабилизацию можно осуществлять отдельно или по dR , или по $d\alpha$, причем последнее предпочтительнее, так как при этом поддерживается постоянная скорость вращения.

С технологической точки зрения динамическую стабилизацию удобнее выполнять в импульсном режиме. Это связано с тем, что требования к стабилизации мощности не являются жесткими; существует некоторый «коридор», в котором мощность должна удерживаться $P_c \pm \Delta P$. При управлении ВЭС например, углом установки с выходом мощности за пределы коридора управляющее напряжение u_α в (5) принимает вид импульсов неизменной скважности и амплитуды, полярность которых выбирается по (10). Генерирование импульсов прекращается при вхождении мощности в заданный коридор.

На рисунке 7 изображены графики процесса импульсного управления углом установки лопастей при стабилизации мощности. Для наглядности график мощности показан увеличенным, а момента – уменьшенным в 10 раз. Угол установки изменяется ступенчато, значительную часть времени механизм установки угла не работает, что повышает эффективность ВЭС. Очевидно, импульсный метод стабилизации также не идеален, так как сопровождается колебаниями вращающего момента ветроколеса, что отрицательно сказывается на его конструкции.

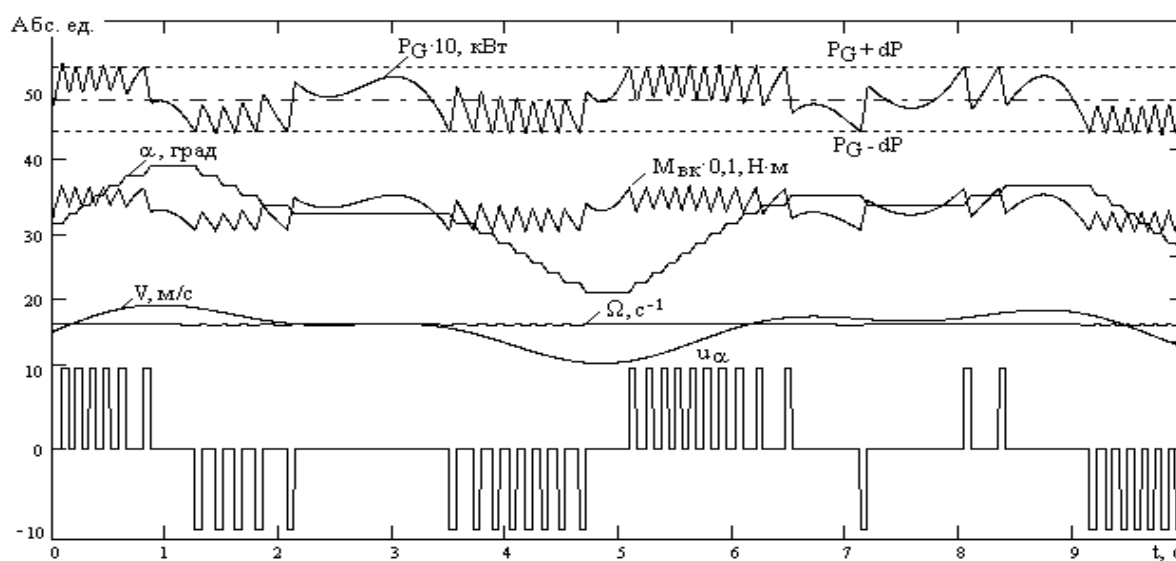


Рисунок 7 – Импульсная стабилизация мощности

Выводы. Предложенное математическое описание ветроэлектрической станции постоянного напряжения позволяет моделировать процессы стабилизации мощности, передаваемой в сеть, как в стационарном, так и в динамическом, импульсном режиме. Отличительной чертой является возможность управления механическими и электрическими средствами, что повышает его качество. Актуальной задачей дальнейшего исследования является реализация элементов системы стабилизации.

Бibliографический список использованной литературы

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И.Яковлев. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ). — Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. — 519 с.
2. Буяльский В.И. Оптимизация системы автоматического управления ветроэлектрической установкой USW56–100 / В.И. Буяльский // Оптимизация виробничих процесів: зб. наук. пр. — Севастополь, 2010. — Вип. 12. — С. 164–167.

3. Мустафаев Р.И. Сравнительная оценка эффективности функционирования современных ветроэлектрических установок / Р.И. Мустафаев, Л.Г. Гасанова // Известия вузов. Сер. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 57–60.

4. Канов Л.Н. Оптимизация режима ветроэлектрической установки постоянного тока по максимуму мощности / Л.Н. Канов // Оптимизация виробничих процесів: зб. наук. пр. — Севастополь, 2011. — Вип. 13. — С. 91–94.

Поступила в редакцию 10.01.2013 г.

Канов Л.М. Математичне моделювання системи стабілізації потужності вітроелектростанції постійної напруги

Запропонований математичний опис вітроелектричної станції постійної напруги для моделювання стабілізації потужності, передаваної в мережу, як в стаціонарному, так і в динамічному, імпульсному режимі. Відмінною рисою є можливість управління механічними і електричними засобами, що підвищує якість стабілізації.

Ключові слова: математичне моделювання, стабілізація потужності, вітроелектростанція постійної напруги, кут установки лопатей, опір збудження.

Kanov L.N. The Mathematical modeling of the System of Stabilizing of Power of Windelectric station direct current

Mathematical description of the windelectric station of direct current is offered for the design of stabilizing of power, transferrable in a network, both in stationary and in dynamic, pulse-mode. A distinguishing feature is possibility of management mechanical and electric facilities, that promotes stabilizing quality.

Keywords: mathematical design, stabilizing of power, windelectric station of direct current, corner of setting of blades, resistance of excitation.