

**Список использованных источников**

1. *Пусковые системы нерегулируемых электроприводов* : монография / А. П. Черный, А. И. Гладырь, Ю. Г. Осадчук, И. Р. Курбанов, А. Н. Вошун. – Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2006. – 280 с.
2. *Вейнгер А. М.* Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейнгер. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
3. *Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления* : учебное пособие / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, И. И. Киба и др. ; под ред. О. Н. Синчука. – Кременчуг : ВПП Щербатых О. В., 2008. – 88 с.
4. *Пронин М. В.* Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов ; под ред. Е. А. Крутякова. – СПб. : Электросила, 2003. – 172 с.
5. *Sen J. and Butterworth N.* (1997). Analysis and Desing of a Three-Phase PWM Converter System for Railway Traction Applications, IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 144, No. 5, pp. 357–371.
6. *Bin Wu.* High-power Converters and AC Drives // John Willey & Sons, New Jersey, 2006. – 112 p.
7. *L. Serrano, Iribarnegaray,* “The Modern Space Vector Theory, Part I: Its Coherent Formulation and Its Advantages for Transient Analysis o Converter-Fed AC Machines”, ETEP, vol.3, no.2, March/April, 1993.
8. *Ключев В. И.* Теория электропривода : учебник для ВУЗов / В. И. Ключев. – М. : Энергоиздат, 1998. – 704 с.

УДК 62-83-52:621.311.24

**Д.Г. Алексеевский**, канд. техн. наук

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина

**ОБЪЯСНЕНИЕ ЭФФЕКТА АВТООПТИМИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ  
МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ**

**Д.Г. Алексієвський**, канд. техн. наук

Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна

**ПОЯСНЕННЯ ЕФЕКТУ АВТООПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ  
СИСТЕМИ ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ**

**Dmitriy Alekseyevskiy**, PhD in Technical Sciences

Zaporozhe State Engineering Academy, Zaporozhe, Ukraine

**EXPLANATION OF THE AUTO OPTIMIZATION EFFECT OF A WIND POWER  
PLANT ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH AN AERODYNAMIC  
MULTIPLICATION**

*Рассмотрен эффект автооптимизации электромеханической системы ветроэнергетической установки на базе схемы с аэродинамическим мультипликатором. Предложен графоаналитический метод анализа статического режима данной системы. На основе графоаналитического анализа определяются условия возникновения эффекта и формулируются рекомендации по повышению эффективности данной системы.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ветротурбина, генератор, оптимальный режим работы, аэродинамическое мультиплицирование.

*Розглянуто ефект автооптимізації електромеханічної системи вітроенергетичної установки на базі схеми з аеродинамічним мультиплікатором. Запропоновано графоаналітичний метод аналізу статичного режиму цієї системи. На основі графоаналітичного аналізу визначаються умови виникнення ефекту і формулюються рекомендації щодо підвищення ефективності цієї системи.*

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, вітротурбіна, генератор, оптимальний режим роботи, аеродинамічне мультиплікування.

*The article presents the auto optimization effect of a wind power plant electromechanical system on the basis of a scheme with aerodynamic multiplier. We proposed the graphic-analytical method for analysis of the system static mode. Based on the graphic-analytical analysis, defines the conditions for the effect origins are defined and frame a guidelines for efficiency improvement of the given are mode.*

**Key words:** wind power plant, wind turbine, generator, optimal mode of operation, aerodynamic multiplication.

**Постановка проблемы.** Эффект автооптимизации ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием был обнаружен при исследовании поведения этой системы в режиме стабилизации угловой скорости вторичных ветротурбин на номинальном значении [1]. Он заключается в том, что при абсолютно жесткой механической характеристике генераторов электромеханическая система автоматически «выбирает» состояния, оптимальные с точки зрения максимального отбора мощности.

Естественным образом возникает проблема математического описания данного эффекта с целью его наиболее эффективного использования при проектировании данных систем.

**Анализ основных исследований и публикаций.** Результаты исследования эффекта автооптимизации рассматривались в публикациях [1] и [2]. Работы проводились с помощью созданной авторами математической модели реальной электромеханической системы ВЭУ.

В работе [1] были приведены результаты моделирования данной системы в статическом режиме в виде диаграмм выработки электроэнергии, по которым можно было судить о наличии эффекта автооптимизации. Также было выявлено, что данный эффект наблюдается только на определенном диапазоне значений скорости первичного ветрового потока.

В работе [2] было исследовано влияние угловой скорости вращения вала генератора на характер диаграммы выработки. Это влияние проявлялось, в основном, в виде расширения диапазона действия данного эффекта с увеличением значения этой скорости.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Эффект автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием, до настоящего момента, был описан только как феномен. Поэтому первым шагом к созданию его теоретического описания, очевидно, должно быть, прежде всего, объяснение данного эффекта.

**Цель статьи.** Основной целью данной работы является объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием с помощью ее адекватного математического представления.

**Материал и результаты исследования.**

**Обоснование зависимости угловой скорости первичной ветротурбины от скорости первичного ветрового потока, обеспечивающей оптимальный отбор мощности**

Сформулируем геометрическую интерпретацию условия оптимального отбора мощности от первичного ветрового потока в форме следующего положения и докажем его справедливость.

**Положение 1.** *В режиме оптимального отбора мощности зависимость оптимальной угловой скорости вращения первичной ветротурбины от скорости первичного ветрового потока представляет собой линейную функцию, график которой проходит через номинальную рабочую точку.*

Данное утверждение является очевидным. Действительно, по определению быстроходности, применительно к первичной ветротурбине:

$$Z_1 = \frac{\omega_1 \cdot R_{BT1}}{V_1}, \quad (1)$$

где  $Z_1$  – быстроходность первичной ветротурбины;

$\omega_1$  – угловая скорость вращения первичной ветротурбины;

$R_{BT1}$  – радиус первичной ветротурбины;

$V_1$  – скорость первичного ветрового потока.

Для оптимального режима с учетом (1) справедливо соотношение:

$$\omega_{1opt} = \frac{Z_{1opt} \cdot V_1}{R_{BT1}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{1opt}$  – оптимальная угловая скорость вращения первичной ветротурбины;

$Z_{1opt}$  – оптимальная быстроходность ветротурбины, соответствующая максимальному значению коэффициента мощности -  $C_{P1}^{max}$ .

Так как значения  $Z_{1opt}$  и  $R_{BT1}$  являются константами, то зависимость:

$$\omega_{1opt} = f_{opt}(V_1) \quad (3)$$

является прямой пропорциональностью. Это утверждение, а также то, что в номинальном режиме отбор мощности должен быть оптимальным, подтверждает приведенное выше положение.

### **Система базисных и относительных величин**

С целью наглядного представления результатов анализа эффекта автооптимизации и получения результатов в обобщенном виде введем систему относительных величин. При этом в качестве базисных выбираются следующие величины:

$V_1^{nom}$  – номинальная скорость первичного воздушного потока (скорость ветра);

$\omega_1^{nom}$  – номинальная угловая скорость вращения первичной аэромеханической подсистемы;

$M_{BT1}^{nom}$  – номинальный момент создаваемый первичной ветротурбиной;

$P_{BT1}^{nom}$  – номинальная механическая мощность первичной ветротурбины;

$V_2^{nom}$  – номинальная скорость вторичного воздушного потока;

$\omega_2^{nom}$  – номинальная угловая скорость вращения вторичной аэромеханической подсистемы;

$M_{BT2}^{nom}$  – номинальный момент создаваемый вторичной ветротурбиной;

$P_{BT2}^{nom}$  – номинальная механическая мощность вторичной ветротурбины.

В первом приближении рассмотрим идеальную систему без потерь. Данный эффект проявляется только в установившемся режиме, поэтому динамические свойства системы в данном анализе не рассматриваются.

Относительная скорость первичного воздушного потока:

$$V_1^* = \frac{V_1}{V_1^{nom}}, \quad (4)$$

где  $V_1$  – фактическая скорость первичного воздушного потока.

Относительная угловая скорость вращения первичной ветротурбины:

$$\omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_1^{nom}}, \quad (5)$$

где  $\omega_1$  – фактическая угловая скорость вращения первичной ветротурбины.

Относительная мощность первичной ветротурбины:

$$P_{BT1}^* = \frac{P_{BT1}}{P_{BT1}^{nom}}, \quad (6)$$

где  $P_{BT1}$  – фактическая мощность первичной ветротурбины.

Относительная скорость вторичного воздушного потока:

$$V_2^* = \frac{V_2}{V_2^{nom}}, \quad (7)$$

где  $V_2$  – фактическая скорость вторичного воздушного потока.

Относительная угловая скорость вращения вторичной ветротурбины:

$$\omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_2^{nom}}, \quad (8)$$

где  $\omega_2$  – фактическая угловая скорость вращения вторичной ветротурбины.

Относительная мощность вторичной ветротурбины:

$$P_{BT2}^* = \frac{P_{BT2}}{P_{BT2}^{nom}}, \quad (9)$$

где  $P_{BT2}$  – фактическая мощность вторичной ветротурбины.

### **Гипотеза про квазиоптимальный режим**

В начале анализа примем гипотезу о том, что наблюдаемый режим является на самом деле квазиоптимальным. В рамках данной гипотезы предполагается, что *существует некоторый идеальный режим автооптимизации системы*. Нахождение условий его возникновения и описание этого режима были бы «ключом» к пониманию наблюдаемого явления.

Действительно, на практике эффект наблюдался только в окрестностях номинальной рабочей точки [1]. По мере удаления от нее, эффект постепенно исчезал, что выразилось в увеличении отклонения от оптимального значения угловой скорости вращения первичной ветротурбины.

Нужно отметить, что для идеального режима свойство, изложенное в положении 1, должно выполняться на всем рабочем диапазоне скоростей ветрового потока, а не только в окрестностях рабочей точки.

**Описание системы с аэродинамическим мультиплицированием в пространстве  $P^*(\omega_1^*, V_1^*)$ .**

В соответствии с приведенной выше системой относительных величин рассмотрим функцию первичной мощности в относительных единицах:

$$P_1^* = f_1(\omega_1^*, V_1^*) = (V_1^*)^3 \cdot C_{P1}^*(Z_1^*), \quad (10)$$

где  $C_{P1}^*(Z_1^*)$  – зависимость коэффициента мощности от быстроходности первичной ветротурбины (может быть определена, например, из выражения, приведенного в [3]).

Быстроходность в (10) определяется из выражения:

$$Z_1^* = \frac{\omega_1^* \cdot R_{BT1}^*}{V_1^*}. \quad (11)$$

В пространстве  $P^*(\omega_1^*, V_1^*)$  выражение (10) будет описывать коническую поверхность, изображенную на рис. 1.

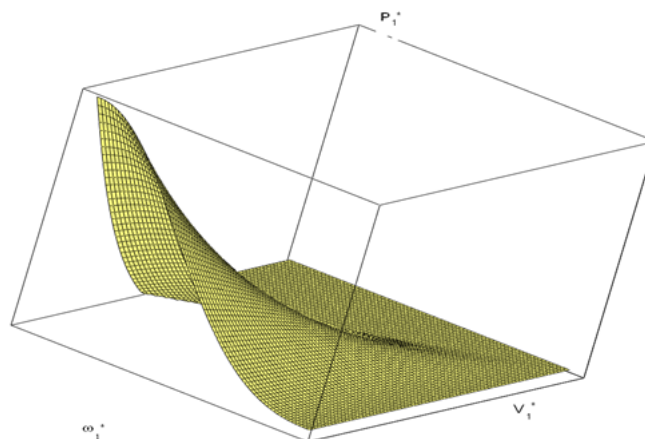


Рис. 1. Поверхность состояния первичной аэромеханической подсистемы

Рассмотрим также аналогичную функцию мощности вторичной аэромеханической подсистемы:

$$P_2^* = f_2(\omega_2^*, V_2^*) = (V_2^*)^3 \cdot C_{P2}^*(Z_2^*), \quad (12)$$

где  $C_{P2}^*(Z_2^*)$  – зависимость коэффициента мощности от быстроходности вторичной ветротурбины (определяется аналогично зависимости –  $C_{P1}^*(Z_1^*)$ ).

Быстроходность в (12) определяется из выражения:

$$Z_2^* = \frac{\omega_2^* \cdot R_{BT2}^*}{V_2^*}. \quad (13)$$

Скорость вторичного воздушного потока пропорциональна угловой скорости первичной ветротурбины, поэтому в системе относительных единиц:

$$V_2^* = \omega_1^*. \quad (14)$$

Поэтому функция (12) может быть записана в следующем виде:

$$P_2^* = f_2(\omega_2^*, \omega_1^*) = (\omega_1^*)^3 \cdot C_{P2}^*(Z_2^*). \quad (15)$$

Напомним, что данный эффект рассматривается в установившемся режиме. Поэтому должен выполняться баланс механической мощности:

$$P_1^* = P_2^* = P^*. \quad (16)$$

Благодаря выражениям (14) и (16) поверхности (10) и (15) могут быть построены в одном пространстве. Рабочие точки системы находятся на линии пересечения этих двух поверхностей.

Искомая зависимость  $\omega_1^* = f(V_1^*)$  будет представлять собой проекцию линии рабочих точек на плоскость  $(\omega_1^*, V_1^*)$ .

Таким образом, может быть сформулирована геометрическая интерпретация эффекта автооптимизации:

**Положение 2.** Эффект автооптимизации возникает при условии, что проекция линии пересечения поверхностей  $f_1$  и  $f_2$  на плоскость  $(\omega_1^*, V_1^*)$  будет представлять собой прямую линию, проходящую через проекцию точки номинального режима.

Положение 2 позволяет объяснить эффект автооптимизации и сформулировать условия его возникновения.

Возникновение данного эффекта обусловлено геометрическими свойствами рассматриваемых поверхностей. В частности, условие, изложенное в Положении 2, может

наступит в случае, если две поверхности представляют собой идентичные поверхности, повернутые одна относительно другой на угол  $90^\circ$  вокруг оси  $OP^*$ .

Это возможно в случае, когда регулирование скоростью генератора осуществляется по закону:

$$\omega_2^* = V_1^*, \tag{17}$$

при условии идентичности характеристик  $C_{P1}^*(Z_1^*)$  и  $C_{P2}^*(Z_2^*)$ .

Описанная ситуация изображена на рис. 2.

Данный режим можно считать идеальным с точки зрения того, что он существует на всем диапазоне изменения скорости первичного воздушного потока.

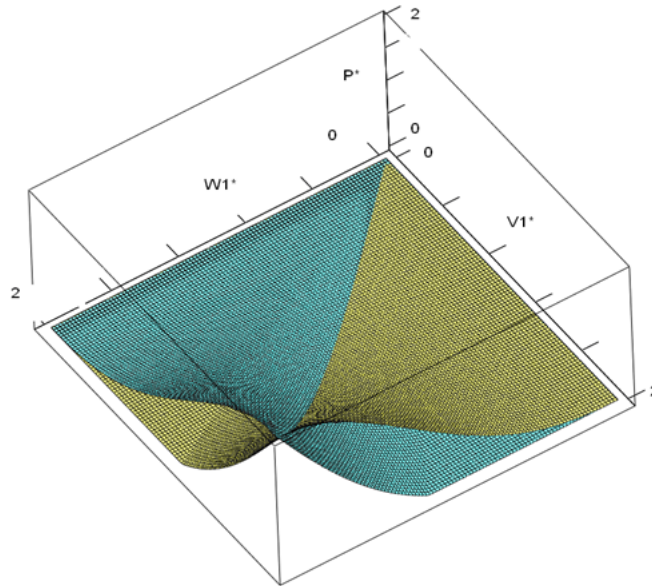


Рис. 2. Графическая интерпретация идеального режима автооптимизации

В наблюдаемом эффекте квазиавтооптимизации значение угловой скорости генератора было фиксировано на уровне номинальной, вследствие абсолютной жесткости характеристики генератора. Графическая интерпретация данной ситуации рассмотрена на рис. 3.

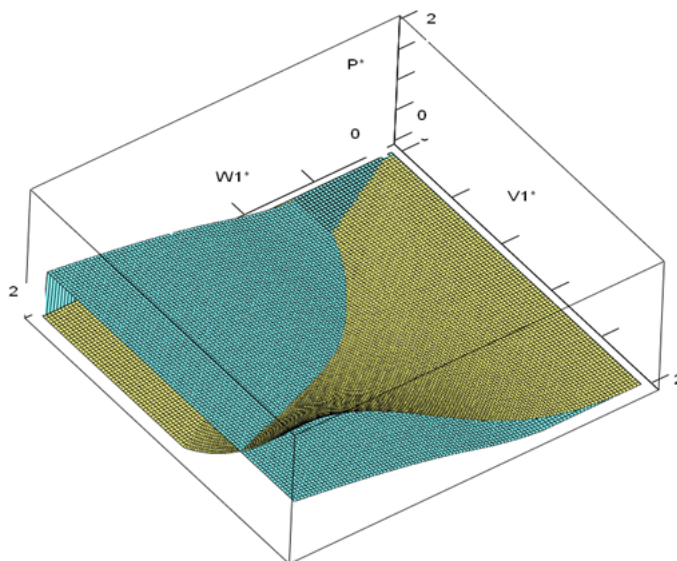


Рис. 3. Графическая интерпретация режима квазиавтооптимизации

Из рис. 3 видно, что условие Положения 2 выполняется только на отдельном участке в окрестностях номинальной точки (на рис. 3 она расположена в центре нижней плоскости).

Квазилинейный характер характеристики  $\omega_1^* = f(V_1^*)$  наблюдается выше и ниже номинальной точки. При этом верхняя часть характеристики не используется, т. к. сверху начинается режим ограничения мощности. Поэтому для расширения диапазона использования данного эффекта по скорости первичного ветрового потока представляется целесообразным расчет номинального режима не на номинальную скорость первичного ветрового потока, а на окончание квазиоптимального режима.

#### **Выводы и предложения.**

1. В работе предложена графическая интерпретация эффекта автооптимизации системы с аэродинамическим мультиплицированием.
2. На основе предложенной графической интерпретации сформулировано условие возникновения эффекта.
3. Предложены пути технической реализации идеального эффекта автооптимизации в виде алгоритма управления скоростью генератора, а также рекомендаций по виду характеристик применяемых ветротурбин.
4. Объяснен эффект квазиавтооптимизации как частный случай идеального режима автооптимизации.
5. Предложенные рекомендации по расширению диапазона действия эффекта квазиавтооптимизации могут быть использованы при проектировании электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

#### **Список использованных источников**

1. *Моделирование* электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый, Д. Г. Алексеевский // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2011. – № 1. – С. 70–73.
2. *Анализ режимов работы* ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, В. П. Метельский, И. Ю. Немудрый // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2012. – № 1. – С. 69–72.
3. *Кривцов В.С.* Неисчерпаемая энергия : учебник. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», Севастополь : Севастоп. нац. тех. ун-т, 2003. – 400 с.