

УДК 621.311.24

Борисюк М.Д., Белопольский В.А., Бусяк Ю.М., Черкашин Б.П.

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОТОКА И УСЛОВИЙ  
УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ВЕТРОКОЛЕСЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ  
РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ**

Структура потока, непосредственно влияющая на надежность работы ветроагрегата, наряду с кинематикой потока в каналах решетки ветроколеса, в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики ВЭУ. В связи с этим их углубленные исследования являются актуальными, т.к. позволяют обеспечить более высокие параметры ВЭУ.

Учет изменений кинематики потока, изменяющейся при изменении режимов работы ветроколеса, позволяет более квалифицированно вести эксплуатацию ВЭУ, обеспечивая в соответствии с величиной циркуляции в решетке уровень выработки электроэнергии, а также правильно проектировать системы регулирования и управления ВЭУ, что способствует повышению надежности и экономичности работы ветрового агрегата.

В соответствии с энергетической теорией ветроколеса величина коэффициента режима работы  $C_b$  и характер изменения его величины [1] определяют величину циркуляции в канале, а коэффициент циркуляции

$$K_{\Gamma} = (C_b^2 - 1)^{0,5}$$

в значительной степени определяет величины подъемной силы, т. е. аэродинамического момента и мощности, которые передаются ветроколесом генератору.

Изменением величины коэффициента режима работы  $C_b$  [1] влияет на величину мощности, передаваемой ветроколесом генератору, так как изменяются величины осевой скорости  $C_a$  входа потока воздуха в решетку ветроколеса и полного давления

$$H = 0,5\rho C_a^2 (C_b^2 - 1),$$

где  $\rho$  – объемная плотность воздуха;  $C_b$  – коэффициент режима работы.

Динамическая система, подлежащая исследованиям, представляет собой вращающееся ветроколесо с движущимся по его каналам воздушным потоком. Для наглядности и получения более полного представления о характере возможных движений в системе, изменяющей свое состояние при изменении режима работы, применим к воздушному потоку в ветроколесе метод фазового пространства [2]. Сущность этого метода описания поведения динамических систем при помощи геометрических представлений заключается в следующем: состояние системы, имеющей  $n$  степеней свободы, т. е. описываемой дифференциальным, или системой дифференциальных уравнений порядка  $2n$ , задается  $2n$  числами. Эти  $2n$  числа можно рассматривать, как задание точки в  $2n$  – мерном пространстве, причем каждой точке пространства будет соответствовать определенное состояние (определенная фаза) системы. Поэтому такое пространство называется фазовым. Для систем, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка, фазовое пространство является двумерным, и в частном случае превраща-

ется в фазовую плоскость. Фазовая плоскость, в которой рассматривается переходной процесс, может иметь ось абсцисс, по которой откладывается отклонения  $x$ , и ось ординат, по которой откладывается скорость  $y = \dot{x}$ . В случае, когда трение равно нулю, уравнение движения имеет следующий вид:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (1)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$x = A \sin (\omega_0 t + \alpha) \quad (2)$$

$$\dot{x} = A \cos (\omega_0 t + \alpha) \quad (3)$$

Изображение переходного процесса на плоскости  $x - y$  можно получить, если в уравнениях (2) и (3) исключить время. В этом случае получаем следующее:

$$\sin (\omega_0 t + \alpha) = x/A; \quad \cos (\omega_0 t + \alpha) = y/A \omega_0$$

Возводя эти соотношения в квадрат, и складывая, получаем:

$$x^2/A^2 + y^2/(A \omega_0)^2 = 1,0 \quad (4)$$

На плоскости  $x-y$  выражение (4) представляет собой семейство подобных эллипсов с полуосями  $A$  и  $A \omega_0$ . Пусть в момент  $t = 0$  состояние системы характеризуется отклонением  $x$  и скоростью  $y$ . Эти значения однозначно определяют на фазовой плоскости точку  $(x,y)$ , которая называется отображающей (или представляющей) точкой. Каждой точке  $(x,y)$  на фазовой плоскости соответствует определенное состояние системы, характеризуемое отклонением  $x$  и скоростью  $y$ . Если с течением времени состояние системы, т. е. ее отклонение  $x$  и скорость  $y$  меняются, то изображающая точка перемещается по некоторой кривой, которая называется фазовой траекторией системы. Фазовая плоскость с нанесенными на ней траекториями называется фазовой диаграммой. Для системы, имеющей уравнение движения (4), фазовыми траекториями являются эллипсы.

Ветроколесо можно рассматривать как динамическую систему, характеризующую поведение (изменением) кинематики потока при изменении режимов работы, вызванном теми или иными причинами (изменением величины скорости ветра, или его направления и т. д.). В фазовой плоскости по оси абсцисс этой системы могут быть отложены величины коэффициентов режима работы  $C_v$ , которые в данном случае характеризуют параметр состояния системы, переходящей от одного состояния (режима) к другому, т. е. отклонение режима работы. По оси ординат необходимо откладывать характерный для данного режима параметр, в качестве которого целесообразно рассматривать абсолютную скорость выхода  $C_2$  потока, которую И.В. Брусиловский назвал «архитектором» треугольника скоростей [3]: за четкое отражение всех возможных изменений в кинематике потока в канале, приводящих так или иначе к соответствующему изменению абсолютной скорости выхода потока  $C_2$ , которая замыкает скоростной треугольник выхода. Вместо вектора скорости  $C_2$  можно рассматривать в качестве отображающей точки точку пересечения вектора скорости  $C_2$  с окружной скоростью вращения ветроколеса. Угол, образованный направлением скорости  $C_2$  и направлением вращения ветроколеса  $\alpha_2 = \arcsin (1/C_v)$ , т.е. этот угол определяется величиной коэффици-



на фокус, то колебания системы затухают, и система находится в устойчивом состоянии.

Будем полагать, что при изменении режимов работы ветроколеса его скорость вращения (отрезок АМ на рис. 1) остается примерно неизменной, т.е.  $\omega \approx \text{const}$ . Тогда при уменьшении скорости  $V_0$  ветрового потока и соответственно скорости  $C_a$  будет происходить изменение режима работы ветроколеса с соответствующим изменением кинематики потока, которое выражается в трансформации скоростных треугольников. Последовательное изменение треугольников скоростей при снижении скорости  $V_0$  ветрового потока изображено на рис. 1, где скорость  $C_a = C_1$  последовательно уменьшается от величины, соответствующей отрезку ОВ, до величины соответствующей отрезку ОО<sup>1</sup>. При этом отображающая точка А (точка 1) занимала последовательно положения точек 2;3;4. Кривая АА<sup>1</sup> (1...4) является фазовой траекторией движения отображающей точки А, т.е. отрезком спирали с радиусом:

$$\rho = C e^{(-b/\omega)\psi},$$

где  $C$  и  $b$  – постоянные для данной фазовой траектории величины;  $\omega$  – угловая скорость вращения ветроколеса 1/с;  $\psi$  – угол наклона радиуса-вектора в полярных координатах, который характеризует «свертывание» или «наматывание» спирали, т.е. неустойчивое или устойчивое состояния системы.

В исходной точке А (в точке 1) (рис. 1) система находится в устойчивом положении, в равновесии, а величина коэффициента режима работы  $C_v$  в этой точке составляет  $C_v=1,47$ . При движении по фазовой траектории происходит изменение коэффициента режима работы от  $C_v=1,47$  до  $C_v=1,95$  в точке 3, что согласно энергетической теории ветроколеса свидетельствует об интенсивном развитии вихревых образований в межлопастном канале ветроколеса, а в точке 4 значение коэффициента  $C_v=3,2$  свидетельствует о развитии пульсационного движения, при котором частота скоростей пульсации может привести к резонансу с собственной частотой колебаний системы – ветроколеса. В этом случае фазовая траектория АА<sup>1</sup> является отрезком спирали, «свертывающейся» с точки А, а система является неустойчивой.

Началом выхода системы из состояния устойчивого равновесия можно считать точку 2 на фазовой траектории, где  $C_v=1,55$ , учитывая, что согласно энергетической теории ветроколес осевого типа предельное по условиям устойчивости обтекания лопастной решетки является величина коэффициента режима работы  $C_v=1,6$ .

При величинах коэффициента  $C_v > 1,6$  следует, согласно положениям энергетической теории осевых ветроколес, ожидать повышения статистических характеристик турбулентности: интенсивности турбулентности  $\epsilon$  и масштабов турбулентности  $L$  [4].

При малой скорости ветрового потока, соответствующей точки 3 фазовой траектории, повышение коэффициента режима работы до значения  $C_v=1,95$  приводит в соответствие с гипотезами энергетической теории осевых ветроколес к усилению пульсационного движения, возможным вихреобразованием с большими масштабами турбулентности, которые могут привести к падению аэродинамического КПД и передаче ветроколесом генератору меньшей мощности. При этом в скоростных треугольниках величина циркуляции  $\Gamma$  определяется величиной скорости закручивания  $C_{2u}$  (отрезок АВ на рис. 1), на которую оказывают влияние вихревые зоны и интенсивность турбулентности, которые не представляется возможным учесть при построении треугольников скоростей (рис. 1). Этим можно объяснить некоторое несоответствие отрезков АВ;

20<sup>'''</sup>; 30<sup>''</sup> и 40<sup>'</sup>, выражающих скорость закручивания  $C_{2u}$  потока при изменении величины осевой скорости  $C_a$ .

Кроме того, принятие условия  $\omega \approx \text{const}$  при изменении работы ветроколеса является условным, редко реализуемым в эксплуатации ветроэлектростанций, и было принято с целью построения скоростных треугольников при изменении режимов работы ветроколеса и иллюстрации построения фазовой траектории, для пояснения процесса выхода системы из устойчивого состояния. Фактически при уменьшении скорости ветрового потока  $V_0$  величина скорости  $C_{2u}$  уменьшается; при  $V_0 \rightarrow 0$  скорость  $C_{2u} \rightarrow 0$ ,  $W_1 \rightarrow W_2$  и ветроколесо останавливается, т.к. при циркуляции  $\Gamma=0$  величины подъемной силы и вращающего момента равны нулю.

Если принять допущение, что изменение угловой скорости вращения  $\omega$  ветроколеса происходит в тех же отношениях, что и изменения осевой скорости  $C_a$ , т.е. при неизменной величине коэффициента быстроходности  $Z = \frac{\omega R}{\tilde{N}a}$ , то изменение треугольников скоростей будет происходить так, как изображено на рис. 2.

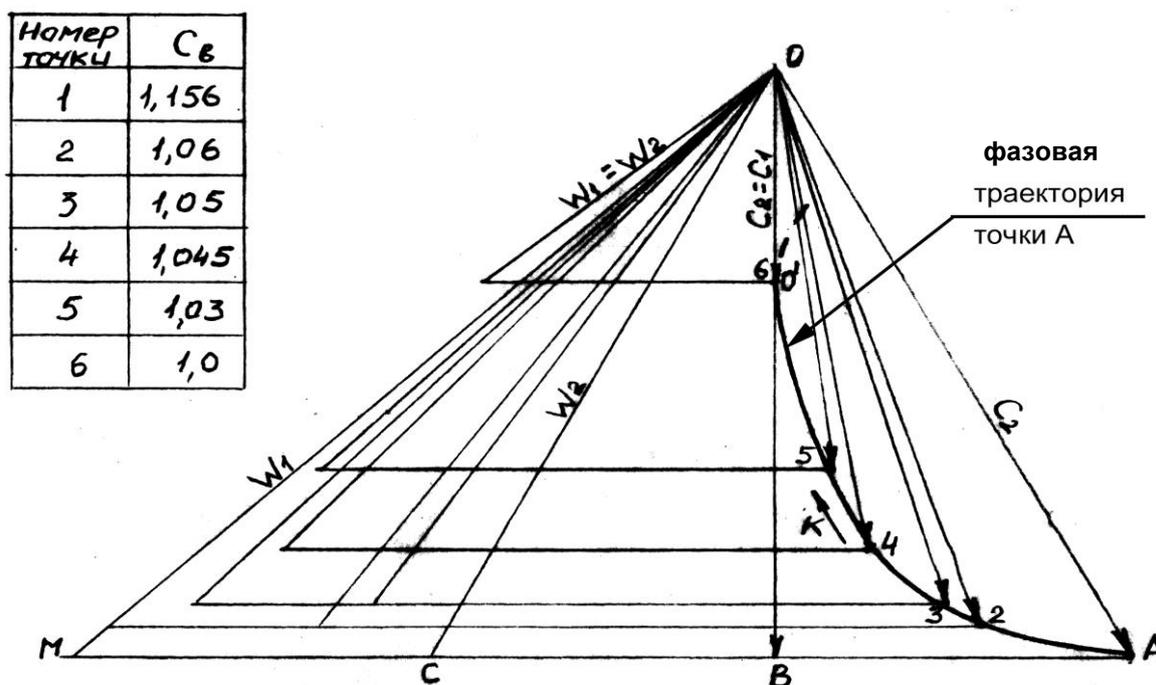


Рисунок 2 – Фазовая траектория устойчивости системы при изменении режимов работы ветроколеса с диффузорной решеткой при  $C_{1u}=0$ ;  $Z \approx \text{const}$

Для этого, поступая аналогично предыдущему, при  $\omega=\text{const}$ , построим фазовую траекторию движения устойчивого фокуса, точки А (рис. 2).

Сопоставляя вид спирали на рис. 1 и на рис. 2 не трудно заметить их отличия. Если на рис. 1 спираль «свертывалась» с точки А и происходил выход из устойчивого состояния системы, то на рис. 2 спираль «наматывается» на устойчивый фокус, каким является точка А. Это находит подтверждение в величинах коэффициентов режима работы, которые в исходном состоянии системы (в точке 1) имели величину  $C_b=1,56$ , а в конечной точке 6:  $C_b=1,0$ , т.е. в канале величина кинетической энергии не возрастает, в связи с чем дополнительная энергия для повышения турбулентности потока и показателей, ее характеризующих (интенсивность турбулентности; масштабы турбулентно-

сти; функция  $F(\kappa)$  отсутствует, что приводит к локализации имеющихся в потоке вихревых зон; стабилизации течения воздушного потока и устойчивости системы в целом.

Работа ветроколеса с коэффициентом режима работы  $C_v = 1,0$  не допустима, т.к. в этом случае абсолютные скорости  $C_2 = C_1$ ; скорость закручивания (циркуляционная составляющая абсолютной скорости выхода  $C_2$  потока)  $C_{2u} = 0$ ; относительные скорости  $w_2 = w_1$ ; циркуляция  $\Gamma = 0$ , т.е. величины подъемной силы  $P_y$  и обусловленный ею аэродинамический (движущий) момент равны нулю. Система будет находиться в устойчивом состоянии до тех пор, пока внешние факторы не выведут ее из этого состояния.

Очевидно, что в реальных условиях эксплуатации ветроэлектрических установок будет наблюдаться картина изменения режимов работы ветроколеса, находящаяся между рассмотренными выше случаями, когда  $\omega = \text{const}$  (рис. 1) или  $z \approx \text{const}$  (рис. 2), которые следует рассматривать в качестве предельных.

При изменении направления ветрового потока относительно плоскости вращения ветроколеса происходит изменение скоростных треугольников: появляется осевая составляющая абсолютной скорости входа потока  $C_{1u} = C_a \text{tg} \gamma$  до этого равная нулю. В связи с этим изменяется величина циркуляции  $\mathbf{u}$ , соответственно, происходят изменения подъемной силы и момента; аэродинамической нагрузки лопасти ( $\tau C_{ж}$ ):

$$\tau C_{ж} = 2 [(K\Gamma)_6 \pm \text{tg} \gamma] \text{Sin} \beta_m, \quad (5)$$

где  $(K\Gamma)_6$  – коэффициент циркуляции при боковом обдуве ветроколеса.

$$(K\Gamma)_6 \cong (K\Gamma)_0 [1 + C_{1u} / (C_{2u})_0], \quad (6)$$

где  $(K\Gamma)_0$  – коэффициент циркуляции, когда ветровой поток перпендикулярен плоскости вращения ветроколеса (угол между направлением скорости ветра и нормалью к плоскости вращения ветроколеса  $\gamma = 0$ );  $(C_{2u})_0$  – скорость закручивания потока воздуха в ветроколесе при  $\gamma = 0^\circ$ .

В выражении (5) знак плюс соответствует случаю, когда скорость  $C_{1u}$  направлена против направления вращения ветроколеса, а знак минус – по направлению вращения.

Коэффициент быстроходности в случае бокового обдува ветроколеса с конфузурной решеткой составляет:

$$(Z_6)_к = \frac{1}{n_6^2 - 1} [(n^2 \text{tg} \gamma + \kappa_r) + \sqrt{(n^2 \text{tg} \gamma + \hat{e}_a)^2 - [n_a^2 (1 + \text{tg}^2 \gamma) - \hat{e}_a^2 - 1] (n_a^2 - 1)}]. \quad (7)$$

Коэффициент быстроходности в случае бокового обдува ветроколеса с диффузорной решеткой составляет:

$$(Z_6)_д = \frac{1}{1 - m_6^2} [(k_r + m^2 \text{tg} \gamma) + \sqrt{(\hat{e}_a + m_a^2 \text{tg} \gamma)^2 - [1 - m_a^2 (1 - \text{tg}^2 \gamma) + \hat{e}_a^2 + 1] (1 - m_a^2)}]. \quad (8)$$

В этих выражениях обозначено:

$m_6, n_6$  – аэродинамические коэффициенты при боковом обдуве ветроколеса соответственно диффузорности и конфузурности потока, равные отношению относительной скорости  $w_2$  выхода потока из решетки к относительной скорости  $w_1$  входа потока в

решетку. Величины аэродинамических коэффициентов показывают характер изменения воздушного потока в межлопастном канале: коэффициент диффузорности  $m$  показывает меру торможения потока в канале:

$$m_6^2 = \frac{1 + (z_6)_д^2 - 2(z_6)_д \kappa_r + \kappa_r^2}{1 + (z_6)_д^2 + 2(z_6)_д \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg}^2 \gamma}, \quad (9)$$

а коэффициент конфузорности  $n$  показывает меру ускорение потока в канале:

$$n_6^2 = \frac{1 + (z_6)_к^2 + 2(z_6)_к \kappa_r + \kappa_r^2}{1 + (z_6)_к^2 - 2(z_6)_к \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg}^2 \gamma} \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) обозначены:

$Z_6$  – коэффициент быстроходности ветроколеса при боковом обдуве ветровым потоком (7),(8);

$\kappa_r$  – коэффициент циркуляции в канале решетки ветроколеса при боковом обдуве ветровым потоком (6);

$\gamma$  – угол между направлением ветрового потока и нормалью к плоскости вращения ветроколеса. За положительное значение угла  $\gamma$  принято, когда направление ветрового потока или его проекция на направление вращения направлены против вращения ветроколеса.

Для создания аэродинамического момента и мощности ветроколеса, передаваемых генератору, обязательным условием является образование в канале решетки циркуляции, которая прямо пропорциональна скорости закручивания потока  $\Delta C_u = C_{2u} - C_{1u}$ . Если при угле  $\gamma = 0$   $\Delta C_u = C_{2u}$ , а  $C_{1u} = 0$ , то при  $\gamma \neq 0$  скорость  $C_{1u} \neq 0$ . Возможен случай, когда при  $\gamma < 0$  в ветроколесе с диффузорной или конфузорной решетками величина скорости  $C_{1u} < 0$ , достигая значения  $C_{1u} = -C_{2u}$ .

В этом случае возможно увеличение циркуляции вдвое по сравнению со случаем, при котором  $\gamma = 0$ . Это благоприятно отражается на величинах аэродинамического (крутящего) момента и мощности агрегата.

Эффективность работы ветрового колеса при боковом обдуве ветровым потоком ( $\gamma \neq 0$ ) уступает эффективности при равномерном натекании по всей ометаемой лопастями поверхности ветроколеса ( $\gamma = 0^0$ ). Это связано с тем, что даже незначительное изменение направления ветра (углов  $\gamma$ ), которое практически постоянно наблюдается в атмосфере, приводит к изменению режима работы ветроколеса и его коэффициента быстроходности  $z_6$  (7), (8).

### Выводы

1. Рассмотрение трансформации скоростных треугольников при изменении режимов работы ветроколеса с использованием фазовой плоскости позволяет выявить изменение кинематики потока в межлопастном канале совместно с проведением анализа устойчивости воздушного потока, обтекающего гидродинамическую решетку ветроколеса.

2. Анализ устойчивости воздушного потока в каналах решетки ветроколеса показал, что изменение режимов работы ветроколеса с соблюдением постоянства коэффициента быстроходности обеспечивает более устойчивое обтекание решетки, чем при соблюдении постоянной скорости вращения ветроколеса. Встречающиеся при эксплуа-

тации ветроагрегатов режимы работы ветроколес могут иметь условия устойчивости потока, находящиеся между исследованными случаями:  $\omega \approx \text{const}$  и  $z \approx \text{const}$ .

3. Рассмотрены режимы работы ветроколес при боковом направлении ветрового потока относительно плоскости вращения ветроколеса, для которых получены выражения для вычисления коэффициентов быстроходности ветроколес с диффузорной или конфузорной решетками при произвольном угле натекания потока воздуха. Полученные выражения для коэффициентов быстроходности позволяют определить скорость вращения ветроколеса при данной осевой скорости входа потока воздуха  $Ca$ .

4. Вычисление величины циркуляции по полученным и приведенным в работе коэффициентам циркуляции  $(K_r)_\delta = \frac{(\Gamma)_\delta}{2\pi(Ca)_\delta}$  позволяет определить значение подъемной силы, т.е. аэродинамического (крутящего) момента и мощности, которые передаются ветроколесом генератору.

5. Данная работа является незначительной частью исследования аэродинамических режимов работы ветроколес, многообразие которых обусловлено многими факторами, вызывающими изменение условий обтекания лопастной решетки и перераспределение давления по поверхности профиля лопасти, которое приводит к изменениям подъемной силы и параметров, от нее зависящих

#### Литература

1. Белопольский В.А., Бусяк Ю.М., Черкашин Б.П., Климов В.Ф. «Аэродинамические коэффициенты энергетической теории ветроколес ветроустановок с горизонтальной осью вращения», научно-технический журнал «Техническая механика», НАН Украины и НКАУ, Институт технической механики, вып.1, Днепропетровск, 2005.

2. Казакевич В.В., Автоколебания (помпаж) в компрессорах, «Машиностроение», М., 1974.

3. Брусилловский И.В., Бушель А.Р., Ушаков К.А. «Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций», Госгортехиздат, М., 1960,

4. Лойцянский Л.Г. «Механика жидкости и газа», Наука, М., 1973.

УДК 621.311.24

Борисюк М.Д., Білопольський В.О., Бусяк Ю.М., Черкашин Б.П.

#### КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПОТОКУ Й УМОВ СТІЙКОСТІ ПЛІНУ У ВІТРОКОЛЕСІ ПРИ ЗМІНІ РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

Викладаються підсумки комплексного дослідження кінематики повітряного потоку і стабільності його течії у вітроколесі, яке розглянуто в якості динамічної системи, яка змінює свій стан при зміні режимів роботи, з використанням методу фазового простору і енергетичної теорії вітроколеса.

Розглянуті особливості зміни режимів роботи вітроколеса при його боковому обдуві повітряним потоком. Для цього випадку приведені формули розрахунку коефіцієнтів швидкохідності вітроколес з різним типом решітки і аеродинамічних коефіцієнтів, які характеризують течію потоку в решітках вітроколес.