

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ

Р.А. Джалилов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрены вопросы распределения активной мощности между параллельно работающими ветроэлектрическим генератором с регулированием угла разворота лопастей и дизель-генератором при изменении мощности нагрузки. Показано, что при одинаковых мощностях ветроэлектрического и дизель-генераторов при скоростях ветра выше расчетной возможно лишь небольшое снижение мощности нагрузки. Если потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего предельно допустимого снижения мощности нагрузки. Выявлено, что условия параллельной работы ветроагрегатов и дизель-генераторов можно улучшить (без учета оптимальности по экономическому показателю) при росте установленной мощности дизель-генераторов. Увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.

Ключевые слова: ветроагрегат, статические характеристики, нагрузка, параллельная работа, мощность, нагрузка, распределение.

ТАЪСИРИ ТАҒЙИРЁБИИ ИҚТИДОРИ БОР БА ТАҚСИМОТИ ИҚТИДОРИ АКТИВ БАЙНИ ГЕНЕРАТОРИ БОДӢ ВА ДИЗЕЛ-ГЕНЕРАТОР

Р.А. Ҷалилов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола масъалаҳои тақсими иқтидори актив байни генератори бодӣ бо танзими кунҷи гардиши парраҷарҳҳо ва дизел-генератор, ки ба таври параллелӣ фаъолият мекунад, ҳангоми тағйир ёфтани иқтидори бор баррасӣ шудаанд. Нишон дода шудааст, ки ҳангоми баробар будани иқтидорҳои генератори бодӣ ва дизел-генератор, ҳангоми аз арзиши ҳисобшуда зиёд будани суръати шамол, танҳо каме коҳиш додани иқтидори бор имконпазир аст. Агар истеъмолкунандагони энергия ба басомади шиддати барқ талаботи сахт надошта бошанд, бо тағйир додани қиёсаки басомади гардиши дизел метавон бачоиқи ҳадди коҳиши бештари бор ноил шуд. Муайян карда шудааст, ки шароити кори параллелии агрегатҳои бодӣ ва дизел-генераторҳо (бе дарназардошти нишондиҳандаи иқтисодӣ) ҳангоми зиёд шудани иқтидори насбшудаи дизел-генераторҳо бехтар кардан мумкин аст. Зиёд шудани ҳиссаи иқтидори насбшудаи дизел-генераторҳо на танҳо ҳудуди суръатҳои ҳадди шамолро васеъ мекунад, балки инчунин ба лпишҳои назарраси бор имконият медиҳад.

Калидвожаҳо: агрегати бодӣ, тавсифоти статикӣ, бор, кори параллелӣ, иқтидор, бор, тақсимот.

THE EFFECT OF LOAD POWER VARIATION ON THE DISTRIBUTION OF ACTIVE POWER BETWEEN A WIND GENERATOR AND A DIESEL GENERATOR

R.A. Jalilov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article examines the issues of active power distribution between a wind power generator with blade pitch angle control and a diesel generator operating in parallel under changing load power conditions. It is shown that when the capacities of the wind generator and the diesel generator are equal, and when wind speeds exceed the rated value, only a small reduction in load power is possible. If energy consumers do not impose strict requirements on the voltage frequency, a greater permissible reduction in load power can be achieved by adjusting the setpoint of the diesel engine rotational speed. It has been found that the conditions for parallel operation of wind turbines and diesel generators can be improved (without considering optimality from an economic standpoint) by increasing the installed capacity of diesel generators. Increasing the share of installed diesel generator capacity not only expands the limits of allowable wind speeds but also allows for significant load fluctuations.

Keywords: wind turbine, static characteristics, load, parallel operation, power, load, distribution.

Введение

Моментно-скоростные статические характеристики ветроагрегатов в существенной мере отличаются от характеристик традиционных агрегатов нестабильностью из-за непостоянства скорости ветра [1]. При осуществлении параллельной работы ветроагрегата с дизель-генератором главной трудностью является обеспечение требуемого качества электрической энергии. Решение данной задачи тесно связано с вопросами распределения активной мощности между агрегатами не только при изменениях скорости ветра, но и при изменениях мощности нагрузки.

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены применительно к схеме, содержащей эквивалентные ветроэлектрический и дизель-генератор, работающие на нагрузку, мощность которой не зависит от частоты напряжения.

Будем полагать, что при расчетной скорости ветра $u = u_p$ статизм регулирования дизеля равен $S=0,03$, а максимальная мощность $P_{н max}$ нагрузки распределяется между параллельно работающими генераторами в соответствии с соотношением:

$$P_{н max} = P_{вн} + k_d P_{дн}, \quad (1)$$

где $P_{вн}$, $P_{дн}$ – номинальная мощность ветроагрегата и дизель-генератора, соответственно, k_d – коэффициент загрузки дизель генератора, характеризующий величину его маневренной мощности.

Мощность ветровой турбины рассчитывалась по известному аналитическому выражению [2, 3]:

$$P_B = \frac{\pi \rho u^3 R^2}{2} \xi(z, \phi) \quad (2)$$

где R – радиус ветроколеса, ρ – массовая плотность воздуха, u – скорость ветра, $z = \frac{\omega R}{u}$ – число модулей быстроходности колеса, ϕ – угол разворота лопастей, ξ – коэффициент использования энергии ветра, представляющий собой отношение полезной механической мощности вращающегося колеса к полной мощности воздушного потока, ометаемого ветроколесом.

Поскольку мощность ветроагрегата с регулированием угла разворота лопастей при скоростях ветра $u < u_p$ ниже номинальной мощности $P_{вн}$, чем ниже величина коэффициента загрузки дизеля k_d в выражении (1), тем большее можно допустить снижение скорости ветра от расчетного значения при неизменной величине мощности нагрузки. Другим фактором, влияющим на выбор величины k_d , является ухудшение режима работы дизеля при нагрузке ниже 40% от номинальной мощности [4,5]. Поэтому принимаем $k_d=0,5$.

Результаты исследования

Вначале оценим распределение активной мощности между параллельно работающими ветроэлектрическим и дизель-генератором, имеющими одинаковую мощность, при изменениях мощности нагрузки. Из анализа рис.1 видно, что при скоростях ветра $u \geq u_p$, когда ветроагрегат имеет номинальную нагрузку, а дизель-генератор, близкую к номинально допустимой, возможно лишь незначительное снижение мощности нагрузки. Так, при выбранном ранее $k_d=0,5$, предельно допустимое снижение ΔP_n мощности нагрузки при неизменной уставке регулятора частоты вращения дизеля составляет всего 9% (точки F-F' на рис.1). Изменение уставки регулятора (с учетом $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$) позволяет довести это снижение до 14,3%. Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов при разных u в этом случае соответствуют точкам В-В', С-С', Е-Е', Д-Д' на рис 1.

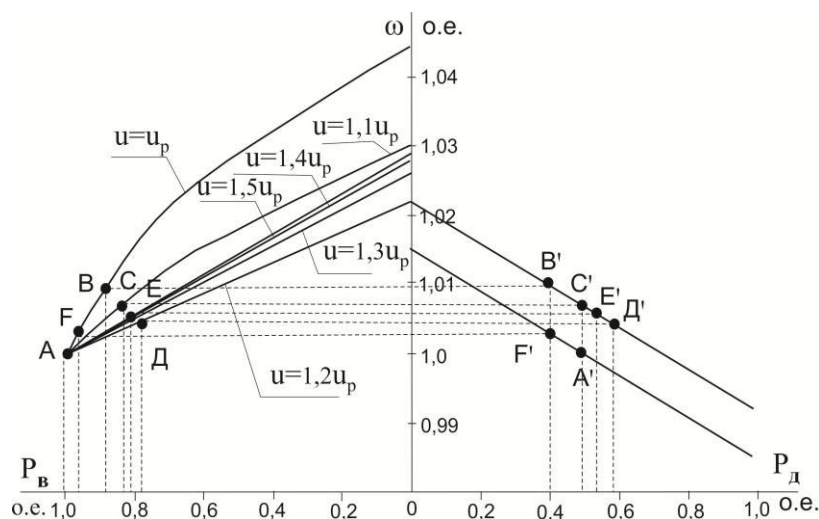


Рисунок 1 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_0:P_г=1:1$ и $u \geq u_p$

Figure 1 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_0:P_g=1:1$ and $u \geq u_p$

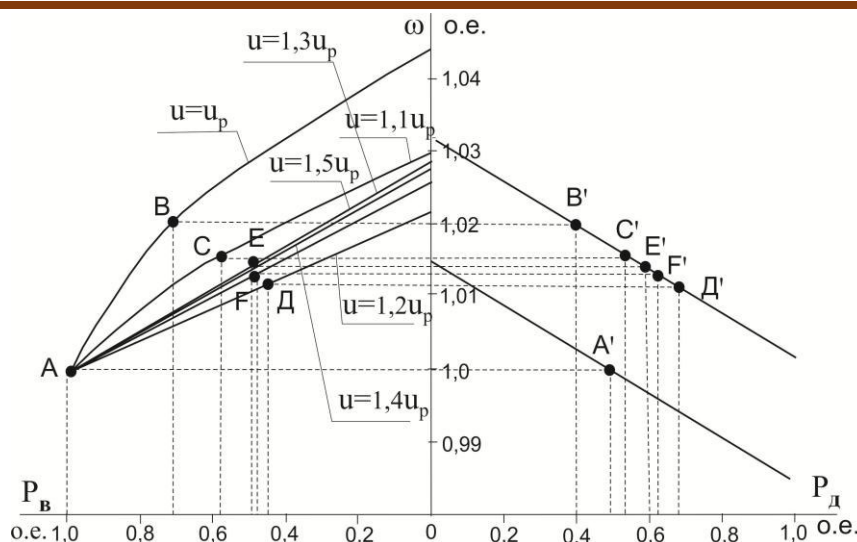


Рисунок 2 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_0:P_6=1:1$ и $u \geq u_p$, $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$

Figure 2 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_0:P_6=1:1$ и $u \geq u_p$, $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$

В тех случаях, когда потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте ω напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего значения ΔP_n . Из анализа рис.2 видно, что при отклонении частоты $\Delta\omega_{\max}=\pm 2\%$ допустимое снижение мощности нагрузки составило 25%. Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов в этом случае соответствуют точкам В-В', С-С', Е-Е', Д-Д', F-F' на рис. 2. Дальнейшее изменение уставки регулятора частоты вращения дизеля в сторону увеличения ω нецелесообразно ввиду снижения выработки ветроагрегата.

Как было отмечено в [2], условия параллельной работы агрегатов при изменениях мощности нагрузки можно улучшить путем подключения балластной нагрузки или устройств аккумулирования энергии в периоды снижения базовой части нагрузки и разработкой дизелей, способных работать при любой самой малой нагрузке. В табл. 1 приводятся предельно допустимые величины уменьшения мощности нагрузки $\Delta P_{\min}$ для различных минимально допустимых уровней загрузки дизель-генератора. Величины ΔP_n рассчитаны по статическим характеристикам рис. 1,2 с учетом изменения уставки регулятора частоты вращения дизеля и условий $|\Delta\omega_{\max}| \leq 1\%$, $|\Delta\omega_{\max}| \leq 2\%$.

Таблица 1 – Предельно допустимые значения уменьшения мощности нагрузки $\Delta P_{\min}$ при различных минимально допустимых уровнях загрузки дизель-генератора

Table 1 – Maximum allowable load reduction values $\Delta P_{\min}$ at various minimum allowable loading levels of the diesel generator

$P_{\min}$, о.е.		0,4	0,3	0,2	0,1	0
ΔP_n , %	$ \Delta\omega_{\max} \leq 1\%$	-14,3	-21	-27,6	-34,3	-41
	$ \Delta\omega_{\max} \leq 2\%$	-25	-31,7	-38,3	-45	-52

Из рассмотренных данных таблицы 1 следует, что снижение технологического минимума загрузки дизеля позволяет значительно расширить диапазон допустимых изменений скорости ветра.

Условия параллельной работы ветроагрегатов и дизель-генераторов можно улучшить (без учета оптимальности по экономическому показателю) при росте установленной мощности дизель-генераторов. На рис.3,4 показано распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при соотношении установленных мощностей $P_d:P_b=2:1$ и $k_d=0,5$.

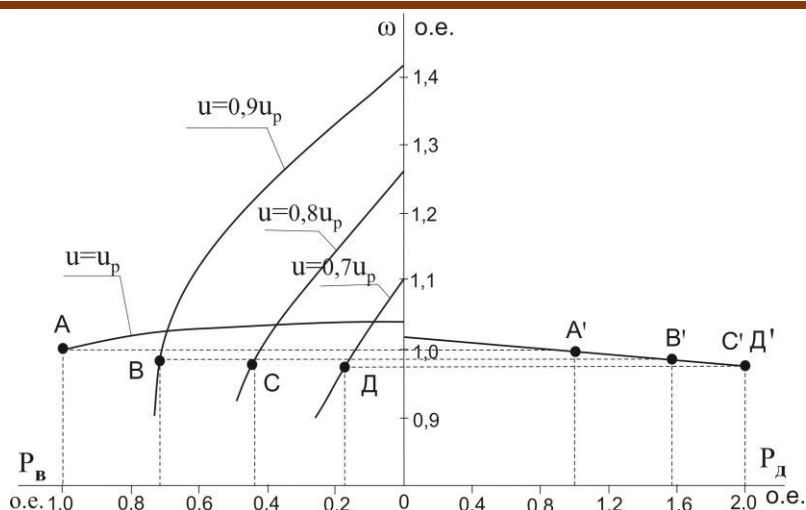


Рисунок 3 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_D:P_B=2:1$ и $u < u_p$

Figure 3 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_D:P_B=2:1$ & $u < u_p$

Как видно из рис. 3,4 увеличение маневренной мощности двигателя позволяет покрывать максимум нагрузки P_{Hmax} даже при отсутствии ветра. В табл.2 приведены предельно допустимые величины уменьшения мощности нагрузки ΔP_{dmin} для различных допустимых $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$, рассчитанные по статическим характеристикам рис.4 с учетом изменения уставки регулятора частоты вращения дизеля и условия $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$.

Таблица 2 – Предельно допустимые значения уменьшения мощности нагрузки ΔP_{dmin} при условии $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$

Table 2 – Maximum allowable load reduction values ΔP_{dmin} under the condition of $|\Delta \omega_{max}| \leq 1\%$

P_{dmin} , o.e.	0,4	0,3	0,2	0,1	0
ΔP_n , %	-15,8	-25,8	-35,8	-45,8	-55,8

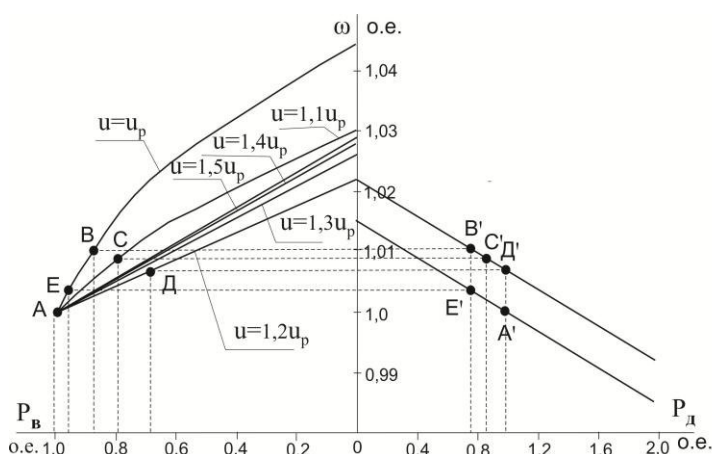


Рисунок 4 – Распределение активной мощности между ветроагрегатом с регулированием угла разворота лопастей и дизелем при $P_D:P_B=2:1$ и $u \geq u_p$.

Figure 4 – Active power distribution between a pitch-controlled wind turbine and a diesel generator at $P_D:P_B=2:1$ & $u \geq u_p$.

Активные мощности ветроэлектрического и дизель-генераторов при различных u и $P_{dmin}=0,4$ соответствуют точкам В-В', С-С', Д-Д' на рис.4.

Сравнительный анализ табл. 1 и 2 показывает, что увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов при неизменном κ_d не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.

Выводы

1. При одинаковых мощностях ветроэлектрического и дизель-генераторов при скоростях ветра выше расчетной возможно лишь небольшое снижение мощности нагрузки.
2. Если потребители энергии не предъявляют жестких требований к частоте напряжения, изменением уставки частоты вращения дизеля можно добиться большего предельно допустимого снижения мощности нагрузки.
3. Увеличение доли установленной мощности дизель-генераторов при неизменном k_d не только расширяет границы предельных скоростей ветра, но и допускает значительные колебания нагрузки.
4. Выбор соотношения установленных мощностей дизелей и ветроагрегатов, их числа, коэффициента загрузки k_d дизелей при расчетной скорости ветра должен решаться в каждом конкретном случае с учетом требований экономичности, состава и вида нагрузки.

Рецензент: Ш.Дж. Джуразода, к.т.н., доцент филиала МЭИ в г. Душанбе

Литература

1. Джалилов, Р.А. Особенности параллельной работы ветроагрегатов с регулированием угла разворота лопастей и дизель-генераторов / Р.А. Джалилов, А.А. Рагозин // Энергетика... (Известия высших учебных заведений). – 1992. – № 1. – С. 41–46.
2. Abo-Khalil, A.G. Dynamic modeling of wind turbines based on estimated wind speed under turbulent conditions / A.G. Abo-Khalil, S. Alyami, K. Sayed, A. Alhejji // Energies. – 2019. – Vol. 12. – Art. 1907. – DOI: 10.3390/en12101907.
3. Самохвалов, Д.В. Математическая модель ветротурбины малой мощности с горизонтальной осью / Д.В. Самохвалов, А.И. Джабер // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 9. – С. 65–69.
4. Samohvalov, D.V. An experimental investigation on the performance of a single cylinder diesel engine at various partial loads / D.V. Samohvalov, A.I. Djaber // Thermal Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.treng.2024.100288.
5. Zhang, J. Research on combustion and emissions of heavy duty diesel engines under low-speed and low-load conditions in low temperature environments / J. Zhang, G. Liu, H. Xu // PLOS ONE. – 2025. – Vol. 20. – No. 2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0318933.

Reference

1. Dzhaliylov, R. A. Features of Parallel Operation of Wind Turbines with Adjustable Blade Pitch and Diesel Generators / R. A. Dzhaliylov, A. A. Ragozin // Power Engineering (News of Higher Educational Institutions). – 1992. – No.1. – Pp.41–46.
2. Abo-Khalil, A. G. Dynamic Modeling of Wind Turbines Based on Estimated Wind Speed Under Turbulent Conditions / A. G. Abo-Khalil, S. Alyami, K. Sayed, A. Alhejji // Energies. – 2019. – Vol.12. – Art. 1907. – DOI: 10.3390/en12101907.
3. Samokhvalov, D. V. Mathematical Model of a Low-Power Horizontal-Axis Wind Turbine / D. V. Samokhvalov, A. I. Jaber // Bulletin of ETU “LETI”. – 2019. – No.9. – Pp.65–69.
4. Samohvalov, D. V. An Experimental Investigation on the Performance of a Single-Cylinder Diesel Engine at Various Partial Loads / D. V. Samohvalov, A. I. Djaber // Thermal Engineering. – 2024. – DOI: 10.1016/j.treng.2024.100288.
5. Zhang, J. Research on Combustion and Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines Under Low Speed and Low Load Conditions in Low-Temperature Environments / J. Zhang, G. Liu, H. Xu // PLOS ONE. – 2025. – Vol.20, No.2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0318933.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Чалилов Рустам Абдухамидович	Джалилов Рустам Абдухамидович	Jalilov Rustam Abduhamidovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Ph.D., associate professor
ДТТ ба номи академик М.С.Осими	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E.mail: drustam@mail.ru		