

Метод определения оптимального резерва электроэнергии ГАЭС для выравнивания графика ВЭС Гемалмазян Д. А.

*Гемалмазян Дереник Агааронович / Gemalmazyan Derenik Aharonovich – аспирант,
ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики», г. Ереван, Республика Армения*

Аннотация: в статье представлен метод определения оптимального резерва электроэнергии ГАЭС для выравнивания графика ВЭС. Представлен пример суточного графика электроэнергии выработки комплекса ВЭС-ГАЭС и стратегия выравнивания графика.

Ключевые слова: ветровая электростанция, гидроаккумулирующая электростанция, оптимальный запас, выравнивания графика.

На основании анализа результатов мониторинга ветров в Республике Армения [1] можно сделать вывод, что скорость ветра в Армении не имеет постоянного доминирующего значения. Значит график выработки ветровой электростанции (ВЭС) тоже будет иметь переменный характер. Это делает необходимой реализацию мер, которые позволят максимально выравнивать график выработки ВЭС. Для примера рассмотрена площадка в районе горного перевала Карахач, на которой планируется строительство ВЭС Карахач с номинальной мощностью 200 МВт. Исследования показывают, что средняя скорость ветра в этой местности на высоте 50 м от земли составляет 8.2 м/с.

Чтобы выровнять график выработки ВЭС, рассмотрена возможность применения гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС). Основная задача - определить оптимальную мощность ГАЭС при имеющихся данных производительности ВЭС.

Используя результаты мониторинга, можно определить объем электроэнергии, которая может производиться в дневное и ночное время, а также объем электроэнергии, которая необходима для выравнивания графика.

По разработанной стратегии планируется пополнять верхний резервуар в промежутке 23:00-07:00, то есть в это время ГАЭС будет работать в насосном режиме, а в промежутке 07:00-23:00 ГАЭС будет работать в генераторном режиме так, чтобы выравнивать график выработки ВЭС. Поскольку время работы ГАЭС в насосном и в генераторном режимах не меняется, то есть время пополнения резервуара ГАЭС строго периодично, то предлагается воспользоваться моделью пополнения запасов [2] с фиксированным периодом. В этой модели промежуток между пополнениями запаса фиксирован и строго периодичен и не зависит от спроса (потребления) в предыдущем периоде или от прогнозируемого спроса в будущем.

Обозначим время между пополнениями запаса, с 07:00 до 23:00, $T = 16$ часов или $2/3$ суток, а время пополнения запаса, с 23:00 до 07:00, $L = 8$ часов или $1/3$ суток. Таким образом, планируемый в данной модели период равен $T + L$, что составляет 1 сутки. Если прогнозируемый среднесуточный спрос на планируемый период равен W , стандартное отклонение ежедневного спроса S , а приемлемый риск возникновения дефицита за этот период принять равным A , то, очевидно, что необходимый на этот период времени запас равен спросу за $T + L$ плюс безопасный резерв.

На рисунке 1 представлен пример суточного графика выработки электроэнергии комплекса ВЭС-ГАЭС.

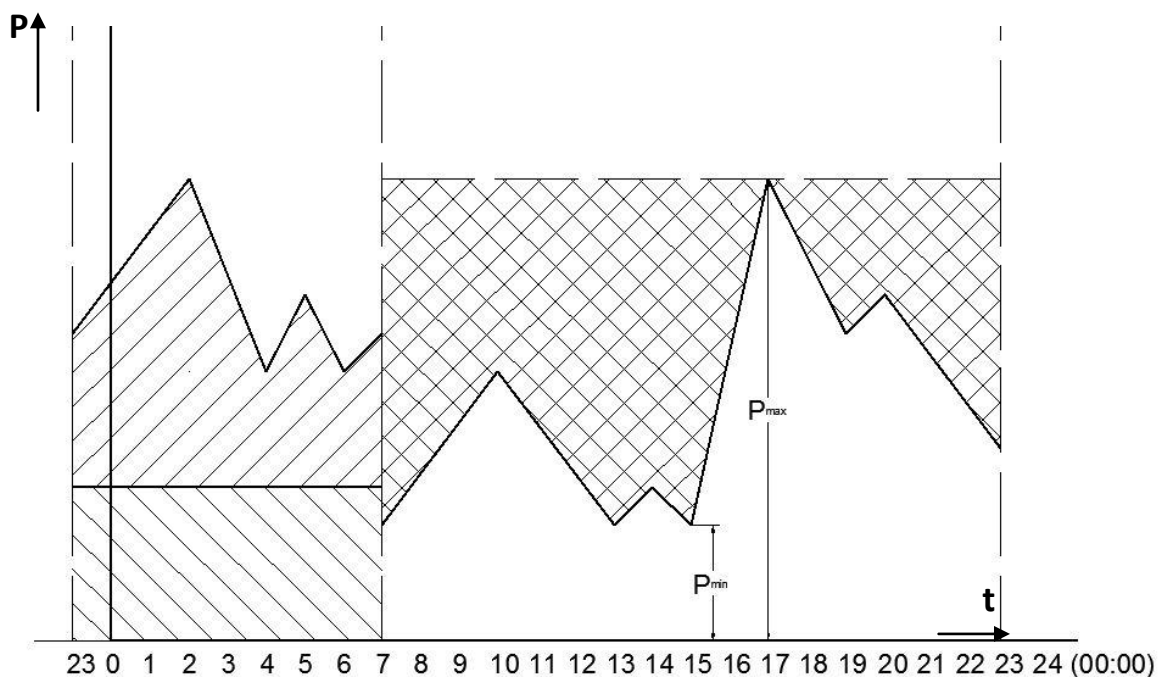
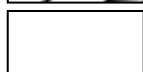


Рис. 1. Пример суточного графика электроэнергии выработки комплекс ВЭС-ГАЭС

Где



$W_{\text{ночь}}$ вырабатываемая электроэнергия ВЭС с 23:00 до 07:00,



$W_{\text{ВЭС}}$ вырабатываемая электроэнергия ВЭС с 07:00 до 23:00,



$W_{\text{выр}}$ электроэнергия для выравнивания графика с 07:00 до 23:00,



$W_{\text{сеть}}$ потребление электроэнергии с сетей (23:00-07:00):

В ночное время ГАЭС работает в насосном режиме, используя электроэнергию ВЭС $W_{\text{ночь}}$ и при необходимости потребляет электроэнергию с сетей, чтобы пополнить верхний резервуар, а днем ГАЭС работает в генераторном режиме вырабатывая электроэнергию $W_{\text{выр}}$ и выравнивает график ВЭС.

$W_{\text{ночь}}$ и $W_{\text{ВЭС}}$ можно определить из результатов мониторинга, а $W_{\text{выр}}$ определяется из уравнения (1)

$$W_{\text{выр}} = 16 \cdot P_{\text{макс}} - W_{\text{ВЭС}} \quad (1)$$

где: $W_{\text{выр}}$ – объем электроэнергии, необходимой для выравнивания графика с 07:00 до 23:00;

$P_{\text{макс}}$ – максимальное значение электроэнергии с 07:00 до 23:00;

$W_{\text{ВЭС}}$ – вырабатываемая электроэнергия ВЭС с 07:00 до 23:00;

В табл. 1 представлена необходимая суточная электроэнергия для выравнивания графика ВЭС за 1 год в МВтч.

Таблица 1. Необходимая суточная электроэнергия для выравнивания графика ВЭС

	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
1	757	191	348	729	661	550	948	450	185	246	467	116
2	415	218	504	1014	530	533	688	392	334	117	175	450
3	295	123	346	595	663	847	587	189	561	588	278	324
4	411	448	286	716	619	540	599	930	451	187	229	200
5	141	560	62	461	584	658	856	719	456	197	494	155
6	456	628	382	531	461	902	744	562	268	381	543	237

7	265	453	183	896	661	556	168	594	502	787	205	317
8	413	386	558	524	611	640	737	766	738	395	305	246
9	287	176	437	571	383	731	821	537	692	805	726	492
10	372	506	341	1059	1037	709	726	926	822	858	247	334
11	145	520	387	660	529	992	387	343	406	698	761	306
12	454	572	263	571	382	187	792	747	904	592	614	487
13	378	427	362	459	572	374	727	368	644	388	547	124
14	436	733	360	427	433	772	609	927	407	490	254	147
15	101	105	760	678	690	628	416	769	467	37	351	425
16	676	429	335	312	257	596	454	703	290	635	489	387
17	220	338	598	350	465	273	612	585	424	642	606	158
18	604	374	499	348	914	715	436	667	634	200	398	73
19	231	298	676	560	743	325	237	398	160	223	505	54
20	444	630	801	386	370	626	407	613	306	533	365	153
21	433	127	475	619	431	644	572	371	532	240	230	491
22	142	458	583	661	436	331	779	931	426	420	168	497
23	319	318	635	810	889	938	579	643	136	151	495	77
24	290	519	541	309	646	508	648	579	329	265	287	441
25	265	571	665	500	773	1014	737	522	509	424	189	283
26	206	817	640	652	701	1132	549	559	505	501	294	154
27	226	552	469	711	624	424	909	603	459	357	525	410
28	110	602	214	913	505	1122	731	390	441	554	130	397
29	423	0	529	1002	361	809	566	416	193	309	223	634
30	95	0	181	358	489	657	403	771	176	403	254	564
31	136	0	443	0	794	0	802	546	0	919	0	576
Сум.	10147	12079	13862	18383	18212	19733	19227	18513	13360	13543	11353	9709

Соответствующие преобразования позволяют представить элементы выборки в виде вариационного ряда и определить его статистические характеристики. Для обеспечения корректности выбора числа и ширины интервалов вариационного ряда воспользуемся формулой Стерджеса [3]

$$m = 1 + 3.322 \ln(n) \quad (2)$$

$$k = (W_{\max} - W_{\min}) / m \quad (3)$$

где m - число интервалов, k - ширина интервалов, n - объем (общее число элементов) выборки; W_{\max} , W_{\min} соответственно максимальное и минимальное значения элементов выборки.

Таким образом, получим,

$$m = 1 + 3.322 \ln(365) = 20.599 \text{ интервалов}$$

$$k = (W_{\max} - W_{\min}) / m = 53 \text{ МВтЧ}$$

Примем $k = 53$ МВтЧ, число интервалов $m = 22$, а также начало первого интервала

$$W_{\text{нач}} = W_{\min} - 0.5 * k = 11 \text{ МВтЧ} \quad (4),$$

Тогда вариационный ряд примет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2. Статистические характеристики вариационного ряда

i	Интервал		Середина интервала W_i	Эмпирические частоты n_i	$u_i = W_i * n_i$	$v_{1i} = (W_i - W)^2 * n_i$	$v_{2i} = (\ln W_i - \ln W)^2 * n_i$
1	11	64	38	3	114	598215	19.45
2	64	117	91	7	637	1084160	19.6
3	117	170	144	19	2736	2203485	28.02
4	170	223	197	20	3940	1653676	16.23
5	223	276	250	21	5250	1155268	9.22
6	276	329	303	21	6363	692153	4.65

7	329	382	356	27	9612	446164	2.58
8	382	435	409	39	15951	222592	1.13
9	435	488	462	34	15708	17286	0.08
10	488	541	515	32	16480	29674	0.12
11	541	594	568	31	17608	215892	0.77
12	594	647	621	28	17388	521337	1.71
13	647	700	674	18	12132	646057	1.95
14	700	753	727	20	14540	1175660	3.28
15	753	806	780	15	11700	1309379	3.39
16	806	859	833	8	6664	971351	2.34
17	859	912	886	5	4430	805819	1.82
18	912	965	939	9	8451	1858740	3.93
19	965	1018	992	4	3968	1030030	2.05
20	1018	1071	1045	2	2090	628213	1.18
21	1071	1124	1098	1	1098	376323	0.67
22	1124	1177	1151	1	1151	444158	0.75
	$n = \sum n_i$	$\bar{W} = \frac{\sum n_i}{n}$	$S_n = \sqrt{\frac{\sum v_{1i}}{n}}$	$S_{ln} = \sqrt{\frac{\sum v_{2i}}{n}}$			
	365	485	223	0.585			

Из приведенной таблицы видно, что среднее арифметическое элементов выборки равно $\bar{W} = 485$ МВтЧ.

Для проверки соответствия эмпирического распределения $F_n(W)$ логнормальному $F_{ln}(W)$ воспользуемся критерием Колмогорова [3, 4], критическое значение которого на уровне значимости $\alpha = 0.05$ в соответствии со справочными данными равно $\lambda_{0.05} = 1.36$. Ход и результаты такой проверки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Проверки эмпирического распределения

i	W_i	n_i	$w_i = n_i/n$	$F_n(W) = w_{i-1} + w_i$	$F_{ln}(W)$	$ F_n(W) - F_{ln}(W) $
1	38	3	0.008	0.008	0	0.008
2	91	7	0.019	0.027	0	0.027
3	144	19	0.052	0.079	0.002	0.07
4	197	20	0.055	0.134	0.067	0.067
5	250	21	0.058	0.192	0.123	0.069
6	303	21	0.058	0.249	0.188	0.061
7	356	27	0.074	0.323	0.317	0.06
8	409	39	0.107	0.43	0.39	0.04
9	462	34	0.093	0.523	0.515	0.008
10	515	32	0.088	0.611	0.625	0.014
11	568	31	0.085	0.696	0.718	0.022
12	621	28	0.077	0.773	0.792	0.019
13	674	18	0.049	0.822	0.85	0.028
14	727	20	0.055	0.877	0.893	0.016
15	780	15	0.041	0.918	0.925	0.007

16	833	8	0.022	0.94	0.948	0.008	
17	886	5	0.014	0.953	0.965	0.012	
18	939	9	0.025	0.978	0.977	0.001	
19	992	4	0.011	0.989	0.986	0.003	
20	1045	2	0.005	0.995	0.992	0.003	
21	1098	1	0.003	0.997	0.997	0	
22	1151	1	0.003	1	1	0	
						$D = \max(F_n(W) - F_{ln}(W))$	0.07
						$\lambda = D * \sqrt{n}$	1.34

Из табл. 3 следует, что условие $\lambda < \lambda_{0,05}$ выполняется для случая $F_{ln}(W)$, т. е. с эмпирическими данными согласуется гипотеза о логнормальном законе распределения. При этом данный закон распределения описывается следующими числовыми характеристиками [5]:

- Медиана $Me(W) = a = \bar{W} = 485$ МВтЧ
- Математическое ожидание $M(W) = a * e^{s^2/2} = 575$ МВтЧ
- Мода $Mo(W) = a * e^{-s^2} = 342$ МВтЧ (5)
- Дисперсия $D(W) = \sigma^2 = a^2 e^{s^2} (e^{s^2} - 1) = 136161$ МВтЧ²

$$\sigma = \sqrt{D(W)} = 369 \text{ МВтЧ}$$

После вычисления параметров получим

$$\bar{W} = Me(W) = 485 \text{ МВтЧ} \quad (6)$$

и

$$S = \sigma = 369 \text{ МВтЧ} \quad (7)$$

Коэффициент возникновения дефицита

$$Z_\alpha = (ROP - \bar{W})/S = 1.746 \quad (8)$$

где: Z_α - коэффициент возникновения дефицита, ROP – максимальное значение \bar{W} , \bar{W} – средняя суточная вырабатываемая электроэнергия, S – стандартное отклонение \bar{W} .

Тогда оптимальный резерв электроэнергии для выравнивания графика ВЭС получается равной

$$W_{\text{опт}} = \bar{W} * T + Z_\alpha * S * \sqrt{T} = 848 \text{ МВтЧ (с 07:00 до 23:00, 16 часов)} \quad (9)$$

где: $W_{\text{опт}}$ – оптимальный резерв электроэнергии для выравнивания графика ВЭС, Z_α - коэффициент возникновения дефицита, \bar{W} – средняя суточная вырабатываемая электроэнергия, S – стандартное отклонение \bar{W} , T – период между пополнениями запаса.

Выводы

1. Предложен метод, позволяющий оценить оптимальный резерв электроэнергии для выравнивания графика ВЭС.
2. По данным измерения скорости ветра за год определено, что распределение необходимой суточной электроэнергии для выравнивания графика ВЭС подчинено логнормальному закону.

Литература

1. *Marjanyan A. H.*, Wind Power Development in Armenia, February 2008.
2. *Зайцев М. Г., Варюхин С. Е.* Методы оптимизации управления и принятия решений. Примеры, задачи, кейсы, 2008.
3. *Кремер Н. Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика, 2003. – 543 с.
4. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Том 2. Математические методы в теории надежности и эффективности, 1987. - 280 с.
5. *Пугачев В. С.* Теория вероятностей и математическая статистика, 1979. – 495 с.