

К ВОПРОСУ ГИБКОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

К.Т.Н. Шарипов У.Б., Расулов А.К.

АО «Средаэнергопроект»

Аннотация. Увеличение доли генерации возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на основе ветра и солнца в единой энергосистеме Узбекистана в увязке соседних стран ставит определённые вызовы перед управляющими энергетическими компаниями. Каким образом доля ВИЭ может быть безопасно интегрирована в сеть с наименьшими потерями и без ущерба надёжности системы?

В данной статье приводится анализ режимов ЭС РУз на 2022г, а также, на ожидаемую перспективу 2024 и 2026 годов. Описываются возможные проблемы с управлением ВИЭ, методология и/или подход к решению, для оптимальной интеграции переменной генерации в ЕЭС РУз..

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), энергосистема Узбекистана, баланс мощности, график потребления электроэнергии, газотранспортная система, накопители электроэнергии.

Abstract. Increasing the share of renewable energy sources (RES) generation based on wind and solar in the unified energy system of Uzbekistan in the linkage of neighboring countries poses certain challenges for energy management companies. How can the RES share be safely integrated into the grid with the lowest losses and without compromising system reliability?

In this article are given analyses of the power system modes of the Republic of Uzbekistan for 2022, as well as the expected future 2024 and 2026. It describes possible problems with RES management, methodology or solution approach to optimally integrate variable generation into the UES of RUz.

Keywords. renewable energy sources (RES), energy system of Uzbekistan, power capacity balance, electricity consumption schedule, gas transportation system, electricity storage.

Доля ВИЭ в мировой энергетике растёт, и это создают определённые вызовы для управления отраслью, поскольку генерация на основе солнца и ветра имеет «прерывистый» и непредсказуемый характер.

В то же время вопросы интеграции в энергетическую систему нестабильных возобновляемых источников энергии глубоко изучены и основательно проработаны. Накоплен и описан богатый практический опыт использования ВИЭ в разных государствах. Общие принципы обращения с ними составлены и подробно сформулированы.

Поэтому при обсуждении перспектив и вопросов планирования развития энергетики желательно обращаться к этому опыту, который, в том числе, обобщён и в ряде документов Международного энергетического агентства [1-3] и других источниках [6-11].

В документах рекомендуется рассматривать четыре стадии распространения переменчивых ВИЭ, каждая из которых имеет свои специфические характеристики. Для каждой стадии даются соответствующие рекомендации.

На первой стадии, когда доля ВИЭ в выработке не превышает 3% от суммарной вырабатываемой электроэнергии, специальных мер для ее интеграции обычно не требуется. На втором этапе, когда доля ВИЭ составляет 3-15%, необходима адаптация имеющихся ресурсов регулирования, технологий и способов управления энергосистемой. На третьем этапе, когда доля ВИЭ превышает 15% от выработки, а также дальнейших стадиях уже требуется перестройка работы энергосистемы и внедрение новых средств и инструментов поддержания работы энергосистемы. Четвертая стадия - 50% и выше выработки ВИЭ-генерации, требует более глубокой перестройки работы энергосистемы, решения вопросов стандартизации технических требований к вводимому оборудованию. В настоящее время стадия 4 является самой высокой фазой интеграции ВИЭ, которая была достигнута на практике.

По различным официальным и неофициальным материалам, прогнозные значения, предполагаемых к вводу мощностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Республике до 2030 года варьируются в пределах от 10 до 30 ГВт. В статье сделана предварительная, очень приближенная, попытка определить необходимый уровень гибкости энергосистемы для принятия таких объёмов мощности ВИЭ. Здесь пока затрагиваются только узкие вопросы готовности энергосистемы к принятию больших объёмов мощностей (электрической энергии) от ФЭС, без учёта нестабильности выдачи мощности ВЭС.

Может ли энергосистема принять (переварить) такое количество (мощности) ВИЭ? Если да, то какими средствами манёвренности станций, генераторов, ГАЭС обладает энергосистема на период ввода мощностей ВИЭ?

Если нет, то какими системами и средствами управления и в каком объёме необходимо обеспечивать процессы внедрения ВИЭ?

На основе данных ретроспективного и прогноза перспективных режимов покрытия потребления нагрузки энергосистемы авторы попытались ответить на эти и другие вопросы, провести оценочные расчёты и предложить возможные способы оценки дополнительных средств и систем регулирования и их объёма.

Рассматриваются вопросы возможности реализации режимов энергосистемы при вводе в состав энергосистемы (ВИЭ) – фотоэлектрических и ветроэнергетических электрических станций (ФЭС и ВЭС) на примере прогноза потребления и ввода новых мощностей ВИЭ на 2024 и 2026 годы. Оценочные расчёты для перспективы потребления основаны на суточных графиках потребления и выдачи электроэнергии станциями на летний дневной максимум 2022 года (12 июля 2022г).

Выработка мощности станциями по ЕЭС РУз на расчетный час ($P_{ЕЭС}$) определяется на основе данных по потреблению с учётом потерь мощности в сетях ($P_{потр}$), суммарных импорта ($P_{имп}$) и экспорта ($P_{экс}$) со смежными энергосистемами:

$$P_{ЕЭС} = P_{потр} - P_{имп} + P_{экс}.$$

Для летнего дневного максимума 2022 года принято в течении суток постоянный суммарный импорт от смежных ЭС $P_{имп} \approx 432$ МВт (Туркменская ЭС 132 МВт, Таджикская ЭС - 309 МВт), экспорт отсутствует.

Данные по балансу мощности по часам расчётных суток приведены в таблице 1.

Таблица 1. Баланс мощности по потреблению и выработке мощности в ЕЭС РУз на 12.07.2022г.

12.07.22 г. часы	Потреблен ие ЕЭС РУз	Импорт от Туркменско й ЭС	Импорт от Таджикск ой ЭС	Экспорт в Афганиста н и РТ	Итого Смежные (Сальдо)	Выработк а мощности ЕЭС Руз
1	7641	123	309	0	432	7209
2	7456	123	309	0	432	7024
3	7281	123	309	0	432	6849
4	7286	123	309	0	432	6854
5	7334	123	309	0	432	6902
6	7628	123	309	0	432	7196
7	7965	123	309	0	432	7533
8	8489	123	309	0	432	8057
9	9097	123	309	0	432	8665
10	9497	123	309	0	432	9065

11	9674	123	309	0	432	9242
12	9649	123	309	0	432	9217
13	9509	123	309	0	432	9077
14	9631	123	309	0	432	9199
15	9627	123	309	0	432	9195
16	9715	123	309	0	432	9283
17	9814	123	309	0	432	9382
18	9705	123	309	0	432	9273
19	9576	123	309	0	432	9144
20	9522	123	309	0	432	9090
21	9705	123	309	0	432	9273
22	9429	123	309	0	432	8997
23	8851	123	309	0	432	8419
24	8189	123	309	0	432	7757

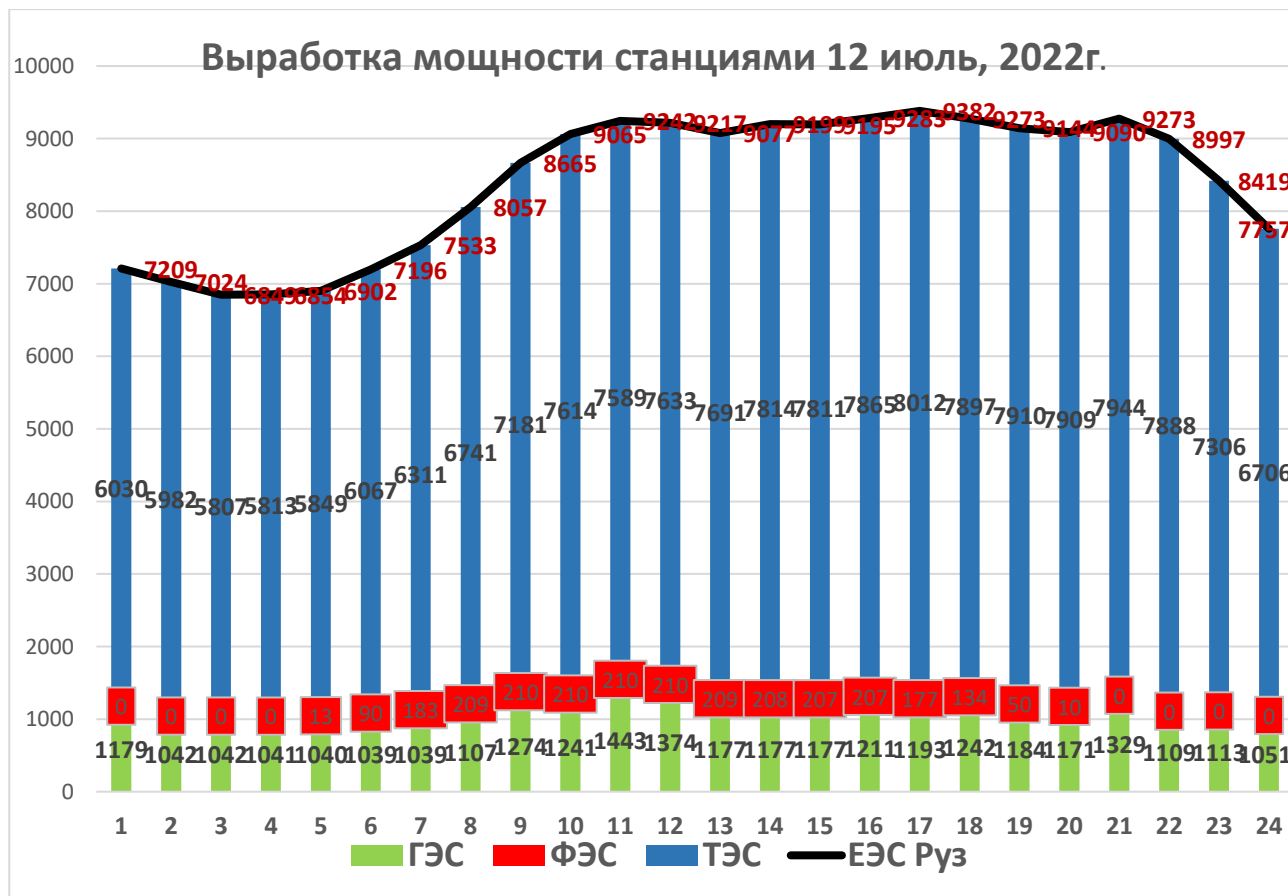
Данные режима по суточной выработке мощности станциями ЕЭС РУз, выдачи мощности ГЭС и ФЭС, с учётом импорта-экспорта электроэнергии в смежные энергосистемы и расчётные значения необходимой выработки мощностей станциями на ископаемых видах топлива ТЭС и ПГУ (далее ТЭС) в ЕЭС РУз приведены в таблице 2. Соответствующие графики характеристик суточного режима показаны на рисунке 1.

Таблица 2. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2022 года, МВт.

12.07.22г. Т, часы	Выработка мощности ЕЭС РУз	Распределение выработки мощности по типам станций, МВт				dP ТЭС МВт в час
		ГЭС	ВЭС	ФЭС	ТЭС	
1	7209	1179	0	0	6030	
2	7024	1042	0	0	5982	-48
3	6849	1042	0	0	5807	-175
4	6854	1041	0	0	5813	6
5	6902	1040	0	13	5849	36
6	7196	1039	0	90	6067	218
7	7533	1039	0	183	6311	244
8	8057	1107	0	209	6741	430
9	8665	1274	0	210	7181	440
10	9065	1241	0	210	7614	433
11	9242	1443	0	210	7589	-25
12	9217	1374	0	210	7633	44
13	9077	1177	0	209	7691	58
14	9199	1177	0	208	7814	123

15	9195	1177	0	207	7811	-3
16	9283	1211	0	207	7865	54
17	9382	1193	0	177	8012	147
18	9273	1242	0	134	7897	-115
19	9144	1184	0	50	7910	13
20	9090	1171	0	10	7909	-1
21	9273	1329	0	0	7944	35
22	8997	1109	0	0	7888	-56
23	8419	1113	0	0	7306	-582
24	7757	1051	0	0	6706	-600
Макс	9382	1443	0	210	8012	440
Мин	6849	1039	0	0	5807	-600
Дельта	2533	404	0	210	2205	
Э/энергия МВт.час	201902	27995	0	2537	171370	
% от суммы	100,0	13,9	0,0	1,3	84,9	

Рисунок 1. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2022 года.



Результаты расчётов показывают:

1. Суточная выработка электроэнергии составила 201902 МВт.час, в том числе выработано на ГЭС – 27995 МВт.час (13,9 %), на ФЭС – 2537 МВт.час (1,3%) и остальные 171370 МВт.час (84,9 %) на ТЭС.
2. Максимальное изменение мощности выработки ТЭС в течении суток составило 2205 МВт (в максимуме 8012 и минимуме 5807 МВт).
3. Максимальная скорость набора мощностей ТЭС 440 МВт в час и скорость снижения мощности 600 МВт в час.

Для реализации графика покрытия потребления, при изменении выработки мощностей ТЭС в течении суток на ~2200 МВт, газотранспортная система (ГТС) обеспечивала изменения подачи газа в пределах 2.56-1.86 миллионов кубометров (таблица 3). Расход газа определён из расчёта ~ 32 тыс.м3/час газа для выработки 100 МВт.

Таблица 3. Предельные суточные значения изменения мощности ТЭС и расхода газа - 2022 год.

Мощности	Р макс	МВт	8012
	Р мин		5807
	dP макс-мин		2205
Расход газа	Q макс	млн.м ³	2.56
	Q мин		1.86
	dQ макс-мин		0.71

Показатели по максимумам изменений мощности в течении суток находятся в пределах ограничений по возможностям регулирования подачи газа ГТС и регулирования мощностей существующими генераторами ТЭС.

Для перспективных режимов принято, что энергосистема РУз, за счет собственных генерирующих мощностей, может обеспечивать полное покрытие потребления.

На 2024 год, в соответствии с данными по развитию схемы приняты:

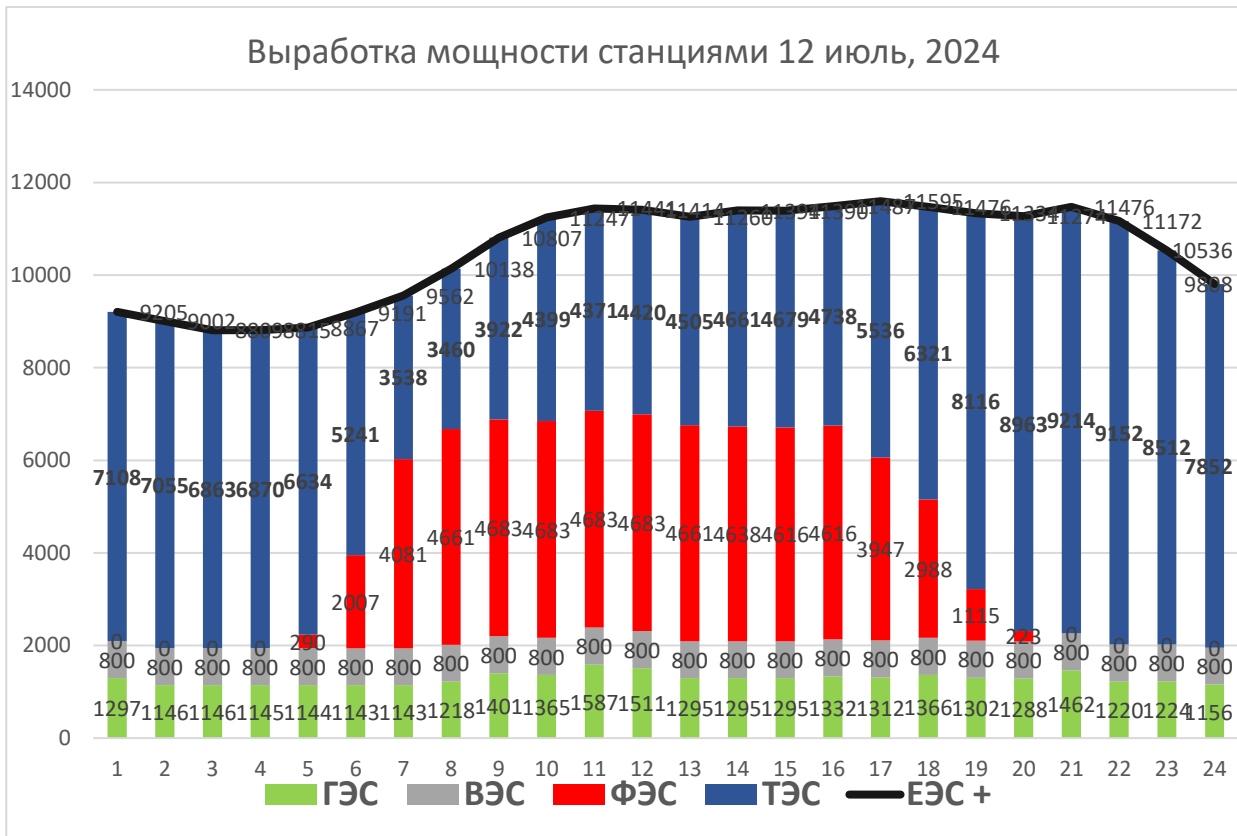
1. Увеличение потребления ЕЭС РУз на 10% по отношению к потреблению 2022 года.
2. Ввод дополнительно новых нагрузок - 400 МВт (ПС Ёшлик).
3. Увеличение выработки ГЭС на 10% относительно к 2022 году.
4. Ввод ВЭС, общей мощностью 1000 МВт, с выдачей в течении суток 80% номинальной мощности.
5. Максимальная мощность введенных на этот период ФЭС - ~4600 МВт, с графиком выдачи мощности аналогичным графику выдачи мощности ФЭС 2022 года.

Данные по суточному режиму приведены в таблице 4. Соответствующие графики характеристик суточного режима показаны на рисунке 2.

Таблица 4. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2024 года.

12.07.22г. часы	Выработка мощности ЕЭС РУз	Распределение выработки мощности по типам станций, МВт				dP ТЭС МВт в час
		ГЭС	ВЭС	ФЭС	ТЭС	
1	9205	1297	800	0	7108	
2	9002	1146	800	0	7055	-53
3	8809	1146	800	0	6863	-193
4	8815	1145	800	0	6870	7
5	8867	1144	800	290	6634	-236
6	9191	1143	800	2007	5241	-1393
7	9562	1143	800	4081	3538	-1703
8	10138	1218	800	4661	3460	-78
9	10807	1401	800	4683	3922	463
10	11247	1365	800	4683	4399	476
11	11441	1587	800	4683	4371	-27
12	11414	1511	800	4683	4420	48
13	11260	1295	800	4661	4505	85
14	11394	1295	800	4638	4661	156
15	11390	1295	800	4616	4679	18
16	11487	1332	800	4616	4738	59
17	11595	1312	800	3947	5536	798
18	11476	1366	800	2988	6321	785
19	11334	1302	800	1115	8116	1795
20	11274	1288	800	223	8963	847
21	11476	1462	800	0	9214	251
22	11172	1220	800	0	9152	-62
23	10536	1224	800	0	8512	-640
24	9808	1156	800	0	7852	-660
Макс, МВт	11595	1587	800	4683	9214	1795
Мин, МВт	8809	1143	800	0	3460	-1703
Делта, МВт	2786	444	0	4683	5754	
Э/энергия, МВт.час	252697	30795	19200	56575	146127	
% от суммы	100,0	12,2	7,6	22,4	57,8	

Рисунок 2. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2024 года.



Результаты расчетов показывают:

1. Суточное потребление электроэнергии составило 252697 МВт.час, для покрытия которого выработано на ГЭС – 30795 МВт.час (12,2 %), на ВЭС – 19200 МВт.час (7,6%), на ФЭС – 56575 МВт.час (22,4%) и остальные 146127 МВт.час (57,8 %) на ТЭС.
2. Максимальное изменение мощности выработки ТЭС в течении суток составило 5754 МВт (в максимуме 9214 и минимуме 3460 МВт).
3. Максимальная скорость набора мощностей ТЭС 1795 МВт в час и скорость снижения мощностей 1703 МВт в час.

Для реализации такого графика покрытия потребления необходимо обеспечить возможность изменения подачи газа в пределах изменения выработки мощностей ТЭС ~5700 МВт, т.е. ориентировочно ГТС в течении суток должна обеспечить возможность изменения подачи газа в пределах 2,95-1,11 миллионов кубометров (таблица 5), что превышает возможности ГТС в 1,8-1,9 раза.

Кроме того, необходимо иметь достаточное количество маневренных генераторов, способных обеспечивать изменения мощности, как в сторону увеличения, так и уменьшения ~ 1700-1800 МВт за час.

Таблица 5. Предельные суточные значения изменения мощности и ТЭС и расхода газа -2024 год.

Мощности	Р макс	МВт	9214
	Р мин		3460
	dP макс-мин		5754
Расход газа	Q макс	млн.м ³	2,95
	Q мин		1,11
	dQ макс-мин		1,84

Для перспективного режима на 2026 год, в соответствии с данными по развитию схемы приняты:

1. Увеличение потребления ЕЭС РУз на 20% по отношению к потреблению 2022 года.

1. Ввод дополнительно новых нагрузок - 650 МВт (ПС Ёшлик).
2. Увеличение выработки ГЭС на 10% относительно к 2024 году.
3. Ввод ВЭС, общей мощностью 1600 МВт, с выдачей в течении суток 80% номинальной мощности.
4. Максимальная мощность введенных на этот период ФЭС - ~9800 МВт, с графиком выдачи мощности аналогичным графику выдачи мощности ФЭС 2022 года.

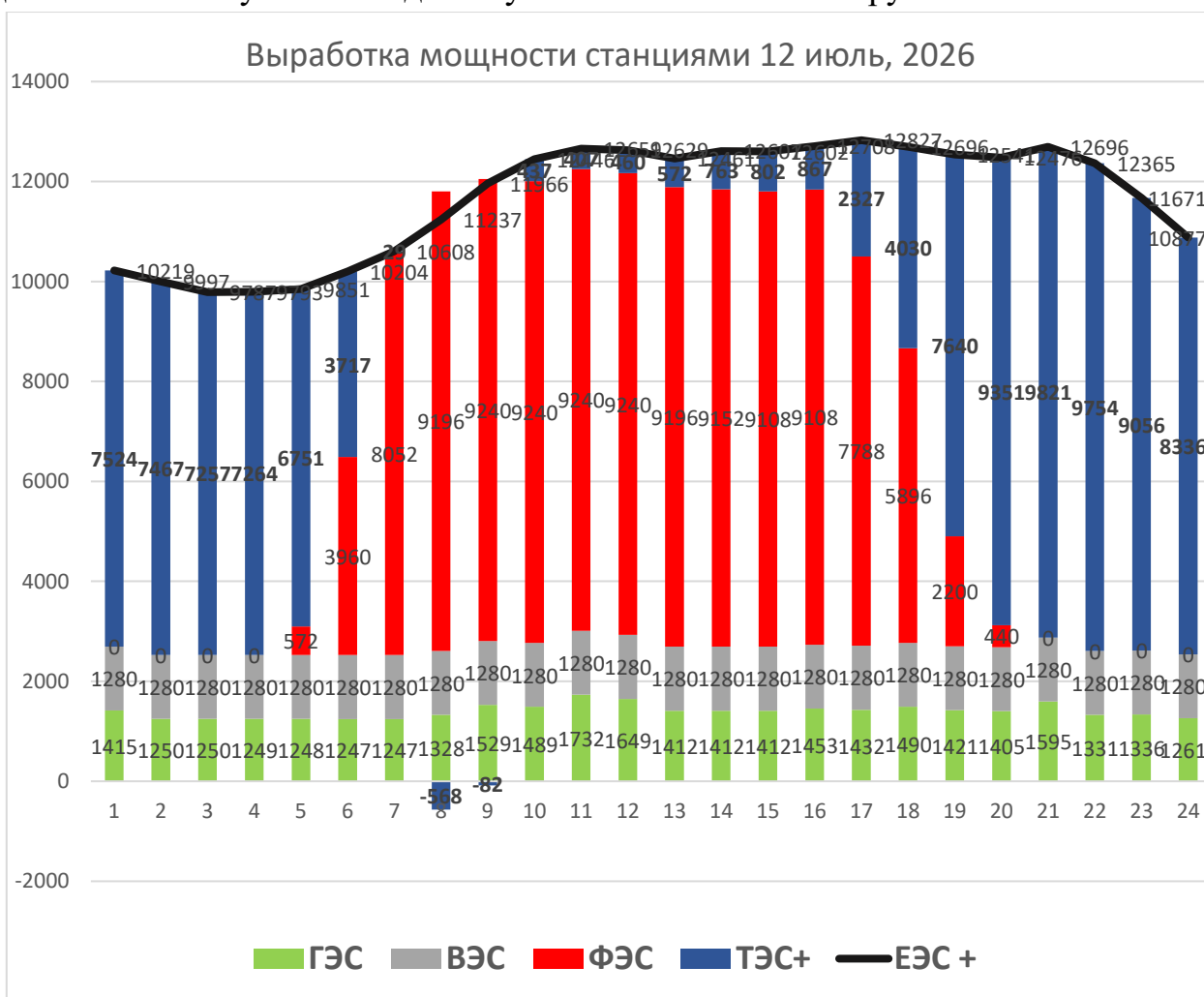
Расчетные данные по суточному режиму на 2026 год приведены в таблице 6. Соответствующие графики характеристик суточного режима показаны на рисунке 3.

Таблица 6. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года.

12.07.22г. Т, часы	Выработка мощности ЕЭС РУз	Распределение выработки мощности по типам станций, МВт				dP ТЭС МВт в час
		ГЭС	ВЭС	ФЭС	ТЭС	
1	10219	1415	1280	0	7524	
2	9997	1250	1280	0	7467	-58
3	9787	1250	1280	0	7257	-210
4	9793	1249	1280	0	7264	7
5	9851	1248	1280	572	6751	-513
6	10204	1247	1280	3960	3717	-3034
7	10608	1247	1280	8052	29	-3688
8	11237	1328	1280	9196	-568	-597
9	11966	1529	1280	9240	-82	485
10	12446	1489	1280	9240	437	520
11	12659	1732	1280	9240	407	-30
12	12629	1649	1280	9240	460	53
13	12461	1412	1280	9196	572	112
14	12607	1412	1280	9152	763	190

15	12602	1412	1280	9108	802	39
16	12708	1453	1280	9108	867	65
17	12827	1432	1280	7788	2327	1460
18	12696	1490	1280	5896	4030	1702
19	12541	1421	1280	2200	7640	3611
20	12476	1405	1280	440	9351	1711
21	12696	1595	1280	0	9821	470
22	12365	1331	1280	0	9754	-67
23	11671	1336	1280	0	9056	-698
24	10877	1261	1280	0	8336	-720
Макс, МВт	12827	1732	1280	9240	9821	3611
Мин, МВт	9787	1247	1280	0	-568	-3688
Делта, МВт	3040	485	0	9240	10389	
Э/энергия, МВт.час	279924	33594	30720	111628	103982	
% от суммы	100,0	12,0	11,0	39,9	37,1	

Рисунок 3. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года без учета минимальной нагрузки ТЭС.

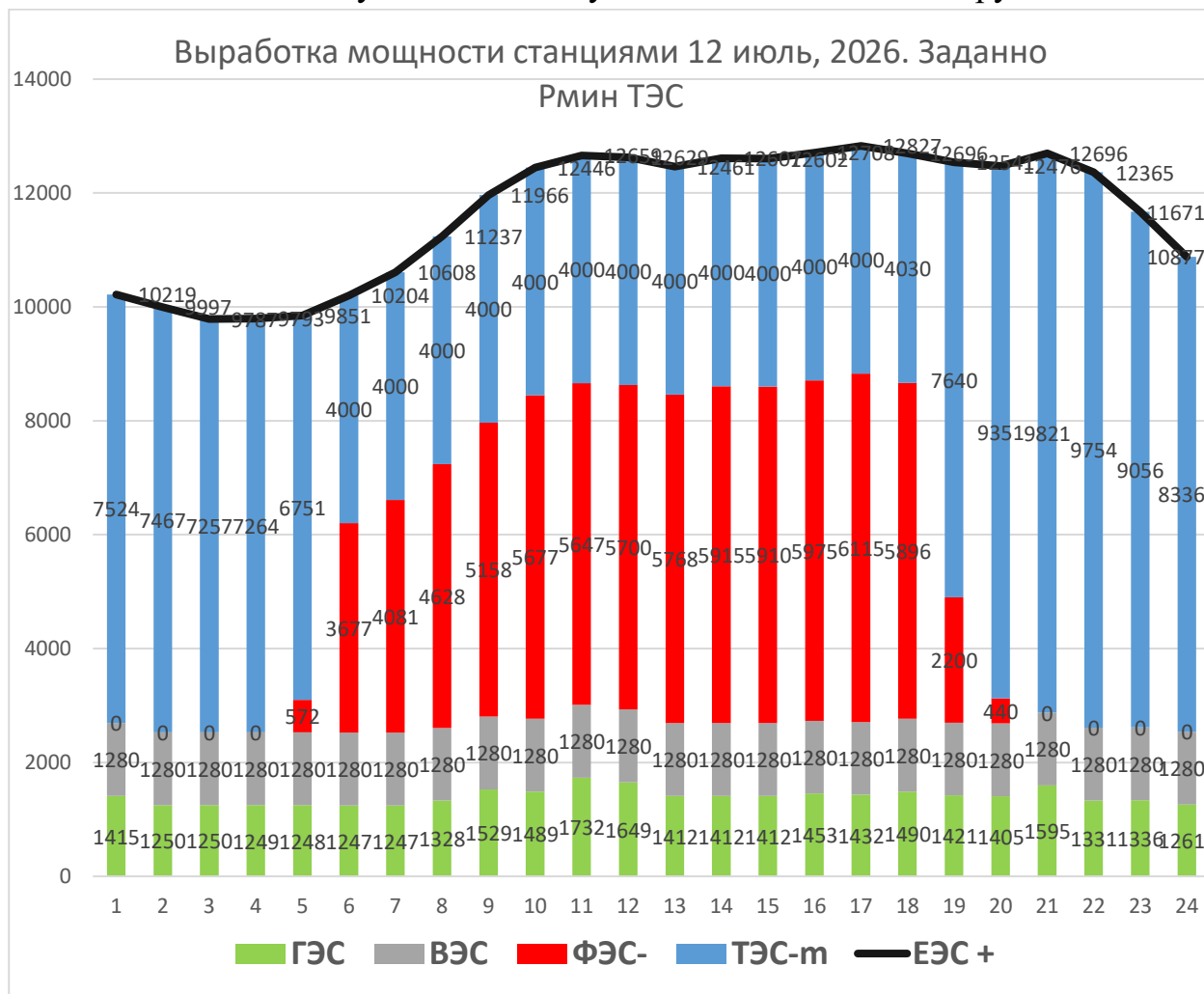


Как видно из результатов, при использовании полной мощности ФЭС необходимо значительное снижение мощностей ТЭС и даже переводить их в режим потребления. Конечно, такие режимы неприемлемы, необходимо рассмотреть ввод мощности ФЭС с учетом режимных и технологических ограничений на состав и объемы мощностей по условиям допустимых минимальных нагрузок ТЭС. В таблице 7 и рисунке 4 приведены расчетные распределения мощностей выдачи по станциям при минимальной, по условиям технологических ограничений, выдаче ТЭС+ ~ 4000 МВт.

Таблица 7. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года с учетом минимальной нагрузки ТЭС ~ 4000 МВт.

12.07.22г. часы	Выработка мощности ЕЭС РУз	Распределение выработки мощности по типам станций, МВт				ΔP ТЭС МВт в час
		ГЭС	ВЭС	ФЭС	ТЭС	
1	10219	1415	1280	0	7524	
2	9997	1250	1280	0	7467	-58
3	9787	1250	1280	0	7257	-210
4	9793	1249	1280	0	7264	7
5	9851	1248	1280	572	6751	-513
6	10204	1247	1280	3677	4000	-2751
7	10608	1247	1280	4081	4000	0
8	11237	1328	1280	4628	4000	0
9	11966	1529	1280	5158	4000	0
10	12446	1489	1280	5677	4000	0
11	12659	1732	1280	5647	4000	0
12	12629	1649	1280	5700	4000	0
13	12461	1412	1280	5768	4000	0
14	12607	1412	1280	5915	4000	0
15	12602	1412	1280	5910	4000	0
16	12708	1453	1280	5975	4000	0
17	12827	1432	1280	6115	4000	0
18	12696	1490	1280	5896	4030	30
19	12541	1421	1280	2200	7640	3611
20	12476	1405	1280	440	9351	1711
21	12696	1595	1280	0	9821	470
22	12365	1331	1280	0	9754	-67
23	11671	1336	1280	0	9056	-698
24	10877	1261	1280	0	8336	-720
Макс, МВт	12827	1732	1280	6115	9821	3611
Мин, МВт	9787	1247	1280	0	4000	-2751
Делта, МВт	3040	485	0	6115	5821	
Э/энергия, МВт.час	279924	33594	30720	73360	142250	
% от суммы	100,0	12,0	11,0	26,2	50,8	

Рисунок 4. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года с учетом минимальной нагрузки ТЭС.



При таком, с учетом минимальных нагрузок ТЭС, решении реализуется неполная выдача мощностей и, соответственно электрической энергии ФЭС. При ограничении 4000 МВт вместо возможной ~119373 МВт.час выдачи суточной электроэнергии, реализуется только 73360 МВт.час, т.е. ~61,4 %.

Результаты расчетов показывают:

1. Суточное выработка электроэнергии всеми станциями составило 279924 МВт.час, в том числе выработано на ГЭС – 33594 МВт.час (12 %), на ВЭС – 30720 МВт.час (11%), на ФЭС – 73360 МВт.час (26,2%) и остальные 142250 МВт.час (50,8 %) на ТЭС.
2. ФЭС выдает в сеть 73360 МВт.час, что составляет 61,4 % от потенциально возможной их дневной выработки (119373 МВт.час).
3. Максимальное изменение мощности выработки ТЭС в течении суток составило 5821 МВт (в максимуме 9821 и минимуме 4000 МВт).

4. Максимальная скорость набора мощностей ТЭС 3611 МВт в час и скорость снижения мощности ~2751 МВт в час.
5. ГТС должна обеспечивать суточное изменение объема подаваемого газа ~ 1.86 млн.м³.

Предлагаемый подход может быть реализован в перспективе, если в планах развития предусмотрены манёвренные генераторы, обеспечивающие требуемые скорости изменения мощностей генераторов ТЭС и возможности газотранспортной системы по регулированию подачи суточного объёма газа в требуемых границах. При этом, для предотвращения дезорганизации работы ГТС необходимо предпринять специальные меры по накоплению дневных излишков газа при регулирующих тепловых станциях с целью их использования в часы подъёма нагрузки.

При отсутствия указанных выше возможностей, обеспечение выдачи полной электроэнергии ФЭС, снижение требований к маневренности блоков ТЭС и газотранспортной системы может быть обеспечено **при использовании накопителей энергии** с характеристиками, позволяющим осуществлять выравнивание графика выдачи мощностей ТЭС.

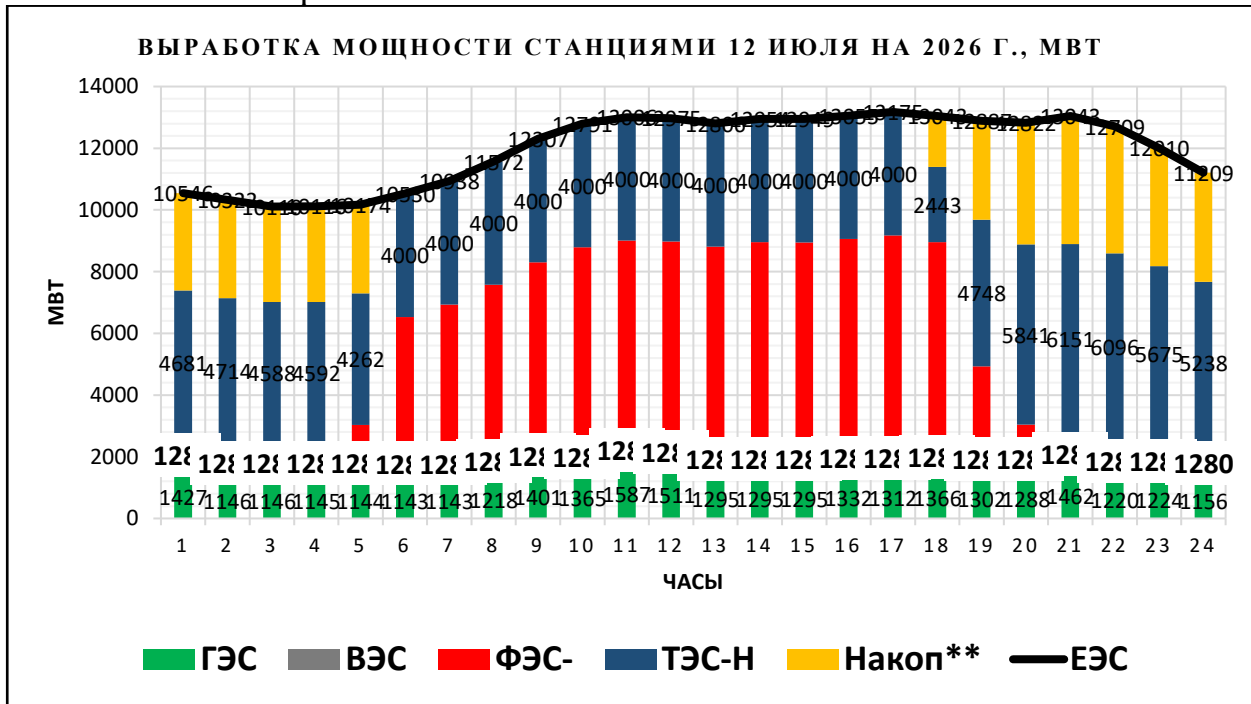
При распределении мощностей с учетом ограничения на минимальные нагрузки ТЭС (таблица 8), часть электрической энергии ФЭС ($119372 - 73360 = 46012$ МВт.час), нереализованная в покрытии суточного графика аккумулируется в накопителях электроэнергии.

Выдача в сеть электроэнергии накопителей может осуществляться по критерию оптимизации равномерности графика выдачи мощностей ТЭС. Результаты одного из возможных вариантов выдачи в сеть накопленной электроэнергии приведен в таблице 8 и на рисунке 5.

Таблица 8. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года с учетом минимальной нагрузки ТЭС ~ 4000 МВт и накопителей энергии на 46012 МВт.час.

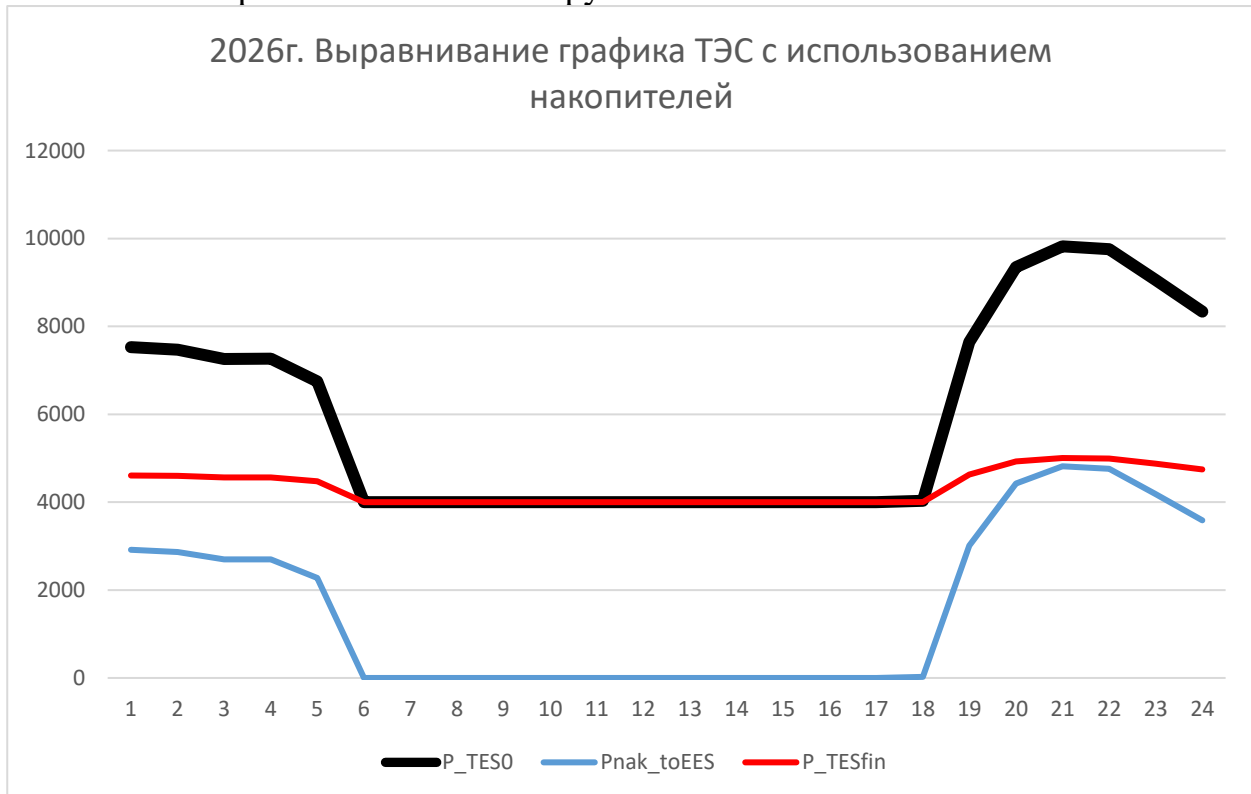
часы	ЕЭС	ГЭС	ВЭС	ФЭС	Накопление	Выдача Накоп.	ТЭС	МВт в час
1	10546	1427	1280	0	0	3158	4681	
2	10322	1146	1280	0	0	3130	4766	85
3	10110	1146	1280	0	0	3092	4592	-174
4	10116	1145	1280	0	0	3099	4592	0
5	10174	1144	1280	612	0	2876	4262	-330
6	10530	1143	1280	4107	-128	0	4000	-262
7	10938	1143	1280	4515	-4096	0	4000	0
8	11572	1218	1280	5074	-4760	0	4000	0
9	12307	1401	1280	5626	-4255	0	4000	0
10	12791	1365	1280	6146	-3735	0	4000	0
11	13006	1587	1280	6138	-3743	0	4000	0
12	12975	1511	1280	6184	-3697	0	4000	0
13	12806	1295	1280	6231	-3603	0	4000	0
14	12954	1295	1280	6379	-3408	0	4000	0
15	12949	1295	1280	6374	-3366	0	4000	0
16	13055	1332	1280	6443	-3297	0	4000	0
17	13175	1312	1280	6583	-1746	0	4000	0
18	13043	1366	1280	6305	0	0	4092	92
19	12887	1302	1280	2353	0	3500	4452	360
20	12822	1288	1280	471	0	4800	4983	531
21	13043	1462	1280	0	0	4700	5601	618
22	12709	1220	1280	0	0	4113	6096	495
23	12010	1224	1280	0	0	3830	5675	-420
24	11209	1156	1280	0	0	3535	5238	-438
Макс, МВт	13175	1587	1280	6583	0	4800	6096	618
Мин, МВт	10110	1143	1280	0	-4760	0	4000	-438
Делта, МВт	3065	444	0	6583	4760	4800	2096	1056
Э/энергия, МВт.час	288047	30924	30720	79540	-39834	39834	107029	
% от суммы	100,0	10,7	10,7	27,6	-13,8	13,8	37,2	

Рисунок 5. Распределение мощностей выдачи по видам станций на летний дневной максимум 2026 года с учетом минимальной нагрузки ТЭС ~ 4000 МВт и накопителей энергии на 39834 МВт.час.



На рисунке 6 приведены графики выдачи мощностей ТЭС без учета накопителей энергии и с их использованием и оптимальной выдачей их мощностей.

Рисунок 6. Графики выдачи мощностей ТЭС без учета и с учетом накопителей при минимальной нагрузке ТЭС $P_{мин} = 4000$ МВт.



Результаты расчетов с использованием накопителей показывают:

1. Суточное потребление электроэнергии составило 288047 МВт.час, для покрытия которого выработано на ГЭС – 30924 МВт.час (10,7%), на ВЭС – 30720 МВт.час (10,7%), на ФЭС – 119373 МВт.час (41,4%), из них выдано непосредственно в сеть 79540 и накопители 39834 и остальные 107029 МВт.час (37,1%) на ТЭС.
2. Максимальное изменение мощности выработки ТЭС в течении суток составило 2096 МВт (в максимуме 6096 и минимуме 4000 МВт).
3. Максимальная скорость набора мощностей ТЭС ~620 МВт в час и скорость снижения мощности ~ 420 МВт в час.
4. ГТС должна обеспечивать суточное изменение мощности в 2096 МВт, что соответствует изменению объема подаваемого газа на ~ 0.67 млн.м³.

Ниже рассмотрены распределения электроэнергии вырабатываемой ФЭС при различных, возможных значениях минимально допустимой выработки мощностей ТЭС.

Таблица 9. Распределение электроэнергии вырабатываемой ФЭС при $P_{\text{мин}}=4000$ МВт.

ФЭС	Full	To EES	To Storage	Add TES	Not Uzer	All to EES
MW.h	111628	73360	38268	38268	0	111628
%	100,0	65,7	34,3	34,3	0,0	100,0

Обозначения в таблице:

Full – потенциально полная электроэнергия вырабатываемая ФЭС;

To EES - электроэнергия непосредственно передаваемая ФЭС в ЕЭС;

To Storage – избыточная электроэнергия передаваемая ФЭС в накопители;

Add TES - электроэнергия выдаваемая накопителями в ЕЭС;

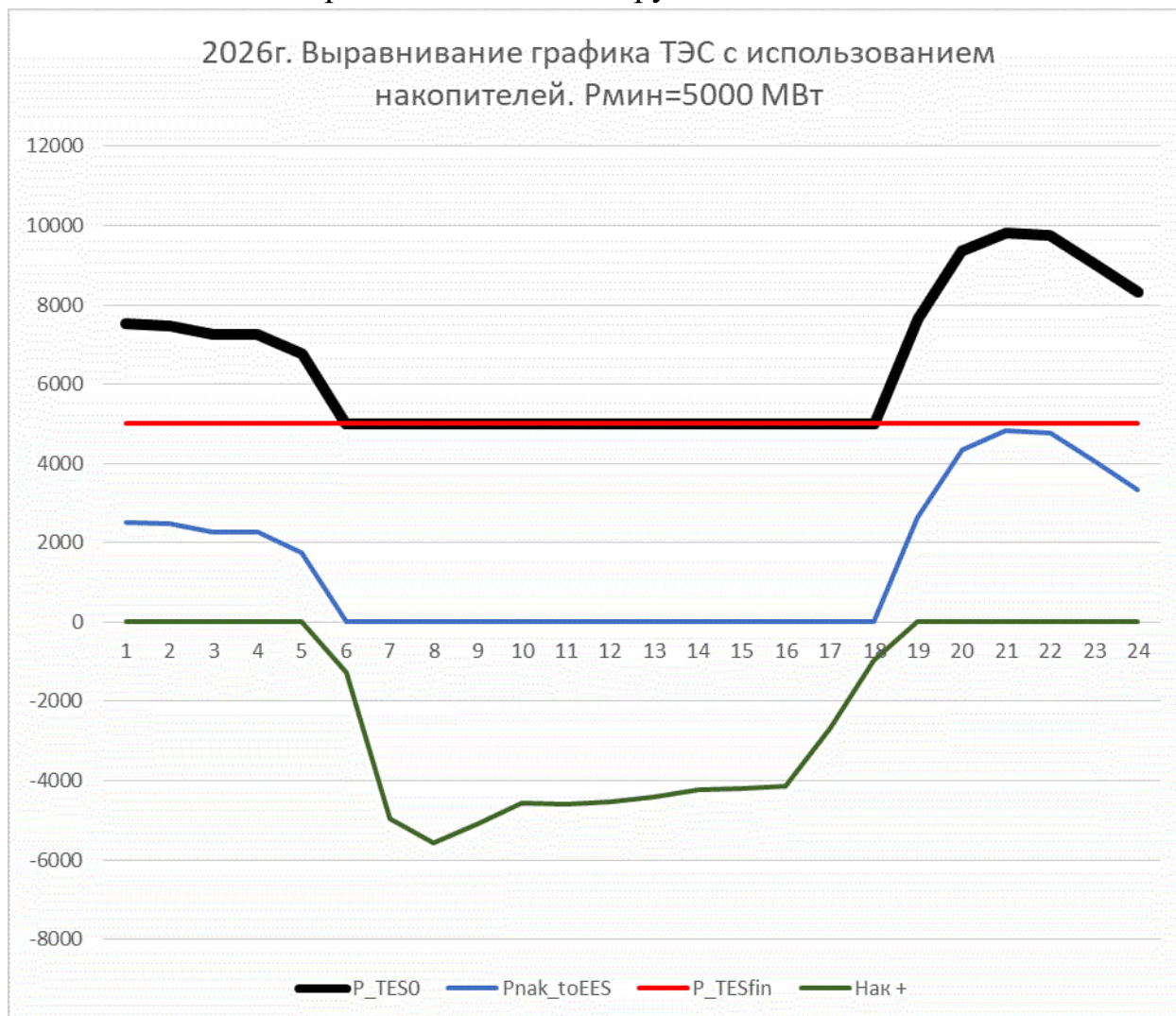
Not Uzer – не используемая часть потенциальной полной электроэнергии ФЭС;

All to EES – вся электроэнергия выработанной ФЭС и переданной в ЕЭС.

Таблица 10. Распределение электроэнергии вырабатываемой ФЭС при $P_{\text{мин}}=5000$ МВт.

ФЭС	Full	To EES	To Storage	Add TES	Not Uzer	All to EES
MW.h	111628	60389	51239	35221	16018	95610
%	100,0	54,1	45,9	31,6	14,3	85,7

Рисунок 7. Графики выдачи мощностей ТЭС без учета и с учетом накопителей при минимальной нагрузке ТЭС $P_{\text{мин}} = 5000$ МВт.



Из результатов расчетов следует, что использованием накопителей при $P_{\text{мин}} > 4000$ МВт можно обеспечивать идеально ровный график для ТЭС, но при этом часть выдачи ФЭС должна быть ограничена.

Заключение.

На основании анализа прогнозных суточных графиков потребления энергосистемы, рассмотрен узкий вопрос обеспечения выдачи мощности предполагаемого объема вводимых в эксплуатацию ФЭС.

Предложена методика (возможный способ) оценки необходимой гибкости энергосистемы – характеристик манёвренности управления выдачи мощности ТЭС, станций на ископаемых видах топлива. На основе методики может быть, с

учётом показателей гибкости энергосистемы, проведена оценка допустимого объёма ФЭС.

При внедрениях большого объёма ВИЭ на достаточно компетентном уровне должен быть проведён мониторинг гибкости энергосистемы, в частности возможности маневрирования выдачи мощности, традиционных и специально выделенных ТЭС, допустимые минимальные значения мощностей ТЭС, скорости набора и снижения мощностей ими с учётом возможностей ГТС.

Должны быть разработаны и утверждены нормы и правила формирования баланса мощности (технические и стоимостные), а также по привлечению ВИЭ к регулированию, разработаны, внедрены технологии не только суточного, но и оперативного (балансирующего) регулирования с широким внедрением средств автоматизации.

При интеграции ВИЭ в энергосистему, для снижения пределов и скорости изменения нагрузок ТЭС и выравнивания их графиков выдачи должно быть уделено особое внимание определению достаточного объёма накопителей энергии, в том числе накопителей дневных излишков газа при регулирующих тепловых станциях с целью их использования в часы подъёма нагрузки.

Техническая осуществимость ввода различных объёмов мощностей ВИЭ и их корректировки, с учётом пропускной способности электрической сети и вопросов противоаварийного управления, релейной защиты, оптимизации перетоков и других, может быть рассмотрена на следующих этапах, после решения вопросов допустимого объёма внедрения ВИЭ исходя из предложенных и других критериев.

Литература.

1. International Energy Agency (IEA). Full report. Next-Generation Wind and Solar Power. 2016.
2. International Energy Agency (IEA). Getting Wind and Sun onto the Grid. 2017
3. IEA. The Power of Transformation - Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems.
4. Energy Action Plans and Progress Reports (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport via E. Fermi) // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. Vol. 51. November. P. 969–985.
5. Сидорович В.А. Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды // <http://renew.ru/> июнь 2017.
6. Сидорович В.А. 100% ВИЭ: новая модель мировой энергосистемы// <http://renew.ru/> ноябрь 2016.

7. Брославский Л.И. Энергетическое право США. Возобновляемые источники энергии// Вестник МГЮА, 2020 №3 С 125-134.
8. IRENA, Новый взгляд на энергетику за 2017 г.: Ускорение преобразований на мировом рынке энергетики. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Абу-Даби. 2017.
9. Горлов А.А. Методика оценки динамики процессов замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками энергии // Вестник ОмГУ. Серия: Экономика, 2016. № 3 С. 21-27.
10. Егорова М.С. Развитие возобновляемых источников энергии – мировой опыт и Российская практика // Вестник науки Сибири, 2013. № 3 (9). С. 146-150.
11. Брославский Л.И. Энергетическое право США. Возобновляемые источники энергии// Вестник МГЮА, 2020 №3 С 125-134.