

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Ищенко Андрей Алексеевич

магистрант, Сибирский федеральный университет, РФ г. Красноярск

Герасименко Алексей Алексеевич

д-р техн. наук, профессор, Сибирский федеральный университет, РФ г. Красноярск

В статье приводятся обоснования использования обобщённых (ортогональных) графиков электрических нагрузок (ОГН), полученных на факторном пространстве признаков методом главных компонент [1–3] по данным статистически представительной выборки графиков нагрузок узлов районной электроэнергетической системы, для моделирования нагрузок, не входящих в указанную совокупность.

Получение ОГН и их свойства. Для матрицы корреляционных моментов (МКМ) центрированных значений мощностей вычисляются M собственных векторов в порядке убывания модулей собственных значений. Решение проблемы собственных значений выполнено для реальной статистически представительной совокупности суточных графиков нагрузки (объём от 48 до 100) в компьютерных программных комплексах (MATLAB, MATHEMATICA и др.), в частности с использованием эффективного итерационного метода, позволяющего получить устойчивый результат с контролируемой точностью. В результате отыскиваются значения первопричин – факторов, отражающих имеющуюся связь между исходными признаками – анализируемыми графиками нагрузок и соответствующими собственными векторами МКМ, малое количество которых используется в дальнейшем вместо признаков. Каждому из собственных векторов соответствует фактор – ОГН, являющийся

линейной комбинацией исходных графиков $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$, центрированных относительно своих математических ожиданий MP_i, MQ_i

$$\Gamma_{kj} = \sum_{i=1}^n v'_{ki} \Delta P_{ij} + \sum_{i=1}^n v''_{ki} \Delta Q_{ij}, \quad j = \overline{1, d}, \quad k = \overline{1, M},$$

где v'_{ki}, v''_{ki} – компоненты собственного вектора $\bar{v}_k$ $2n$ -мерной МКМ;

Также как и собственные векторы, ОГН являются ортогональными (статистически независимыми), некоррелированными (несвязанными) статистическими величинами, отражающие общие закономерности, основные свойства изменения конфигурации электрических нагрузок. Выделенные факторные модели обладают свойством универсальности придают моделям, статистическому методу и в целом процессу моделирования множества режимов (многорежимности) свойства линейности и аддитивности и позволяют с достаточной точностью восстановить исходные параметры изменения нагрузок на интервале времени. В качестве примера на рисунке представлены ОГН, соответствующие первым трём максимальным собственным числам и собственным векторам МКМ, полученной для совокупности 48 исходных суточных графиков одной из энергосистем [4]. Первые три ОГН

ЖАЮТ ОКОЛО 80 % ПОЛНОЙ ДИСПЕРСИИ ИСХОДНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК.

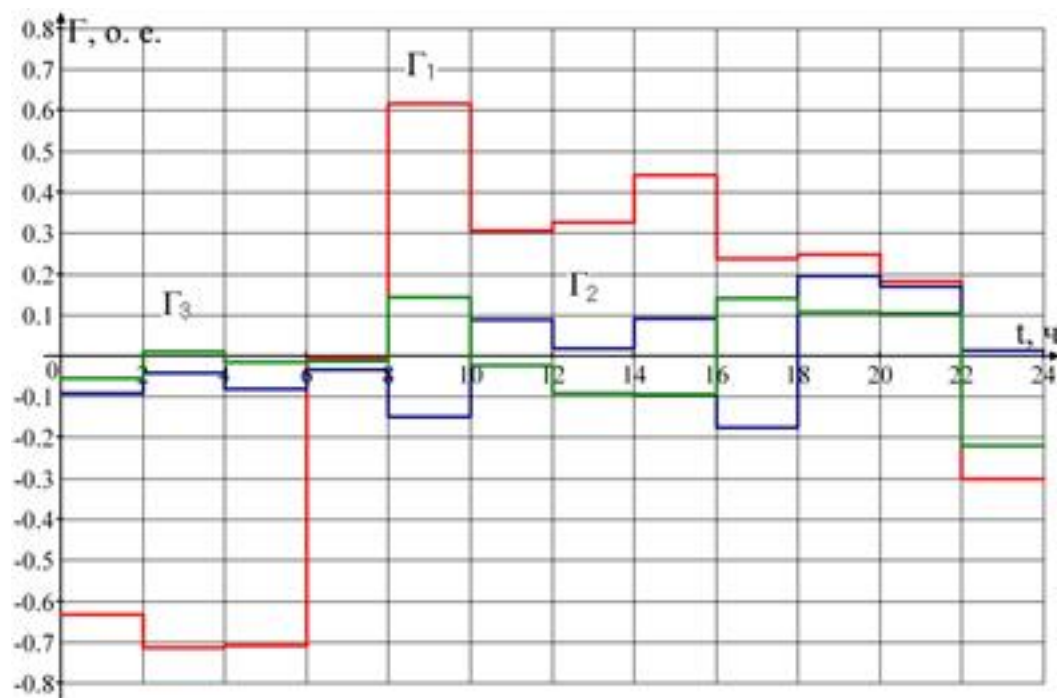


Рисунок 1. Суточные ОГН с количеством интервалов постоянства $d = 12$

Восстановление исходных графиков нагрузки с помощью ОГН. Метод является эффективным, поскольку обратные преобразования в признаковое пространство позволяют использовать небольшое число $M \ll 2n$ главных факторов – ОГН с целью моделирования исходных изменений нагрузок. В этом случае исходные графики P_i, Q_i восстанавливаются с помощью известных математических ожиданий MP_i, MQ_i и моделируемых отклонений от математических ожиданий в виде линейной комбинации двух-четырёх ОГН:

$$P_{ij} = MP_i + \sum_{k=1}^M \mathcal{U}'_{ki} \Gamma_{kj}; \quad Q_{ij} = MQ_i + \sum_{k=1}^M \mathcal{U}''_{ki} \Gamma_{kj}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, d},$$

(2)

где d – количество интервалов осреднения суточного графика нагрузки.

Анализ результатов экспериментальной выборки. Для выборки из 8 схем распределительной сети напряжением 35, 110 кВ с количеством узлов от 2-х до 4-х с электропотреблением, заданным графиками активных и реактивных нагрузок предприятий различных отраслей промышленности [5] составлены МКМ, для которых получены ОГН, соответствующие первым двум собственным векторам. С помощью ОГН восстановлены исходные графики нагрузок и выполнен расчёт потерь ЭЭ в рассматриваемых сетях. Результаты расчёта и сопоставительный анализ качества моделирования представлен далее.

Используемая выборка характеризуется значительной неравномерностью $K_{НР}$ и малой плотностью (заполненностью) K_3 графиков нагрузок (табл. 1). Произведён расчёт средней относительной ошибки

Предоставлена доля вклада при учёте M первыми ОГН

$$\delta_P = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d \frac{P_{P_j} - P_{P_3}}{P_{P_3}} \cdot 100 \%$$

(3)

$$\alpha = \left(\sum_{k=1}^M \lambda_k \right) / \left(\sum_{k=1}^{2n} \lambda_k \right) \cdot 100 \%,$$

(4)

где λ_k – собственное число.

Также для анализа используется коэффициент корреляции

$$R(P_P, P_3) = \frac{1}{d} \sum_{j=1}^d \frac{(P_{P_j} - MP_P)(P_{P_3} - MP_3)}{\sigma P_P \sigma P_3}$$

(5)

Таблица 1

Оценка качества моделирования графиков

№ схемы	№ узла	α , %	K_3	K_{HP}	R	δ_P , %	100
1	1	93,5	0,757	0,604	0,999	0,63	
	2		0,790	0,619	0,990	2,00	
2	1	97,9	0,801	0,618	0,653	4,29	
	2		0,822	0,552	0,991	1,81	
3	1	89,7	0,800	0,700	0,998	0,74	
	2		0,839	0,712	0,461	7,00	
	3		0,662	0,515	0,998	2,37	
	4		0,882	0,745	0,657	6,15	
4	1	95,8	0,833	0,667	0,999	0,26	
	2		0,844	0,641	0,871	5,92	
	3		0,832	0,680	0,762	5,54	
	4		0,887	0,805	0,884	3,02	
5	1	93,6	0,841	0,741	0,986	1,18	
	2		0,806	0,697	0,939	3,15	
	3		0,840	0,750	0,702	6,32	
	4		0,833	0,689	0,983	1,90	
6	1	85,6	0,850	0,741	0,841	4,18	
	2		0,730	0,378	0,922	7,24	
	3		0,724	0,509	0,980	3,42	
	4		0,688	0,361	0,950	5,65	
7	1	84,0	0,757	0,604	0,944	3,96	
	2		0,801	0,618	0,936	4,25	
	3		0,841	0,741	0,772	4,76	
	4		0,730	0,378	0,977	3,72	
8	1	82,3	0,790	0,619	0,982	2,36	
	2		0,822	0,552	0,916	6,18	
	3		0,805	0,697	0,728	7,27	
	4		0,724	0,503	0,999	0,83	

Из результатов расчёта (табл.1) следует, что использование двух собственных значений и соответствующих собственных векторов отражает от 82 до 92 % исходных МКМ. Полученные из МКМ первые два ОГН применительно к каждой схеме моделируют (восстанавливают) исходные графики нагрузок с относительной ошибкой от 0,63 до 7,3%, отражая до 95,7 % полной дисперсии исходных нагрузок с корреляционной связью в интервале 0,65-- 0,99 расчётных и эталонных (исходных) параметров.

Расчёт потерь электрической энергии по восстановленным графикам

нагрузки. Также для сопоставления с предыдущими расчётами в данной выборке схем выполнено моделирование графиков нагрузок с помощью трёх обобщённых ОГН (рис. 1), представленных в таблице 2 [4]. Графики электрических нагрузок, исследуемые в данной работе, не входили в обучающую выборку, из которой получены обобщённые ОГН.

Таблица 2.

Суточные типовые обобщённые графики нагрузок

Номера графиков	Временной промежуток, час									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	-0,633	-0,714	-0,709	-0,0073	0,618	0,306	0,327	0,441	0,238	0,248
2	-0,0928	-0,0423	-0,0815	-0,0345	-0,149	0,0886	0,0192	0,0907	-0,176	0,196
3	-0,0556	-0,0097	0,0154	-0,0118	0,143	-0,0233	-0,0922	-0,0937	0,141	0,108

Выполнено сопоставление точности вычисления статистическим методом [1,2,6] потерь ЭЭ ($\Delta\mathcal{E}_2$) при моделировании графиков нагрузок данной выборки схем двумя первыми ортогональными графиками каждой схем и потерь ЭЭ ($\Delta\mathcal{E}_0$) при моделировании изменения нагрузок тремя обобщёнными ОГН (табл.2).

Данные расчётные значения потерь ЭЭ сопоставлены с эталонными, в качестве которых приняты потери ЭЭ, полученные непосредственным интегрированием (суммированием) потерь мощности по результатам d расчётов установившихся режимов для нагрузок – интервалов постоянства графиков нагрузок

$$\Delta\mathcal{E} = \int_0^T \Delta P(t) dt = \sum_{j=1}^d \Delta P_j \cdot \Delta t$$

Сопоставление результатов расчёта представлено в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты расчёта потерь ЭЭ

№ схемы	K_3	K_{HP}	R	$\Delta\mathcal{E}_3$, МВт·ч	$\Delta\mathcal{E}_2$, МВт·ч	$\Delta\mathcal{E}_0$, МВт·ч	δ_2 , %	δ_0 , %
1	0,757÷	0,604÷	0,990÷	20,310	20,300	20,804	-0,0473	2,
	0,790	0,619	0,999					
2	0,801÷	0,552÷	0,653÷	9,129	9,103	9,188	-0,285	0,
	0,822	0,618	0,991					

3	0,662÷ 0,882	0,515÷ 0,745	0,461÷ 0,998	13,753	13,721	14,360	-0,234	4,
4	0,832÷ 0,887	0,641÷ 0,805	0,762÷ 0,884	15,963	15,659	15,788	-1,904	-1,
5	0,806÷ 0,841	0,689÷ 0,750	0,702÷ 0,986	4,688	4,682	4,656	-0,124	-0,
6	0,688÷ 0,850	0,361÷ 0,741	0,841÷ 0,980	6,765	6,685	6,640	-1,180	-1,
7	0,730÷ 0,841	0,378÷ 0,741	0,772÷ 0,977	53,464	53,254	53,229	-0,393	-0,
8	0,503÷ 0,822	0,503÷ 0,697	0,728÷ 0,999	45,058	44,951	44,997	-0,237	-0,
сх							0,608	1,
$\delta_{\text{ср}}$, %							-0,545±0,496	0,110

Из представленных результатов (табл.3) относительная ошибка расчёта потерь ЭЭ в исследуемой экспериментальной совокупности, при использовании ОГН, полученных индивидуально для каждой отдельной схемы, находятся в диапазоне (-1,04 %; -0,0488 %). При этом средняя относительная ошибка расчёта ЭЭ, вычисленная с помощью обобщённых ОГН статистически представительной совокупности нагрузок, существенно не возрастает и находится в интервале (-1,48 %, 1,70 %). Данная погрешность приемлема для практических расчётов.

Выводы

1. Обобщённые ортогональные графики нагрузок, полученные методом главных компонент из статистически представительного множества графиков электрических нагрузок, являются статистически устойчивыми и могут рассматриваться как типовые, поскольку возможно их применение для восстановления графиков нагрузок, не входящих в обучающее множество исходных признаков, с достаточной для практических расчётов точностью.

2. Для восстановления (моделирования) графиков электрических нагрузок электроэнергетических систем практически без потери точности достаточно использовать от двух до четырёх обобщённых (типовых) ортогональных графиков нагрузок.

Список литературы:

1. Герасименко А.А., Шульгин И.В. Стохастический метод расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических се-тях // Электрические станции, 2013, №4. – С. 44 –59.
2. Герасименко А.А., Нешатаев В.Б. Оптимальный выбор компен-сирующих устройств в распределительных сетях электроэнергетических си-стем // Электричество, 2014, №4, – С. 4-17.
3. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967, 144 с.
4. Герасименко А.А. Применение ЭЦВМ в электроэнергетических расчётах. Учебное пособие.

– Красноярск: Изд. КПИ, 1983. – 116 с.

5. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Изд-е 2-е. Ростов н/Д. Феникс, 2008. – 735 с.

6. Герасименко А.А. Статистическая методология моделирования много-режимности в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии / Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук – Красноярск: СФУ, 2018. – 42 с.