



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ПЕРЕТОКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОНТРОЛИРУЕМОМ СЕЧЕНИИ В ПВК RASTRWIN3

Шепелев Александр Олегович

кандидат технических наук, доцент,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: alexshepelev93@gmail.com

Зерзелиди Александр Михайлович

лаборант лаборатории искусственного интеллекта
электроэнергетических систем
Югорского государственного университета,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: z8034832@gmail.com

Колонцов Владислав Дмитриевич

лаборант лаборатории искусственного интеллекта
электроэнергетических систем
Югорского государственного университета,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: kolontzovvladislav@yandex.ru

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Лаборатория искусственного интеллекта электроэнергетических систем», код темы: FENG-2024-0007).

Предмет исследования: переток активной мощности в контролируемых сечениях.

Цель исследования: нахождение максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях электрической системы в ПВК RastWin3.

Метод исследования: анализ установившихся режимов электрических систем путем многократного утяжеления с использованием различных траекторий утяжеления исходного сбалансированного установившегося режима.

Объект исследования: электрическая система.

Основные результаты исследования: в данной работе производится анализ статической аperiodической устойчивости.

Ключевые слова: переток активной мощности, максимально допустимый переток, аварийно допустимый переток, RastWin3, электрическая система, установившийся режим.

DETERMINATION OF PERMISSIBLE ACTIVE POWER FLOW IN THE CONTROLLED SECTION OF THE PWC RASTRWIN3

Alexander O. Shepelev

Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: alexshepelev93@gmail.com

Alexander M. Zerzelidi

Laboratory assistant at the Laboratory of Artificial
Intelligence of Electric Power Systems,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: z8034832@gmail.com

Vladislav D. Kolontsov

Laboratory assistant at the Laboratory of Artificial
Intelligence of Electric Power Systems,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: kolontzovvladislav@yandex.ru

The research has been conducted within the national assignment by the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (theme "Laboratory of Artificial Intelligence of Electric Power Systems", theme code: FENG-2024-0007).

Subject of research: active power flow in controlled sections.

Purpose of research: to find the maximum permissible and emergency permissible flows of active power in the controlled sections of the electrical system in the PVC RastWin3.

Research methods: analysis of steady-state modes of electrical systems by multiple weighting using different weighting trajectories of the initial balanced steady-state mode.

Objects of research: electric power system.

Research findings: static aperiodic stability is analyzed in this work.

Keywords: active power overflow, maximum permissible overflow, emergency permissible overflow, RastWin3, electrical system, steady state.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач, решаемых системными операторами, является нахождение допустимых перетоков и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях электрической системы. Данная проблема рассматривается как российскими системными операторами, так и иностранными [4].

В данной работе производится анализ статической аperiodической устойчивости. Такой анализ происходит путем многократного утяжеления с использованием различных траекторий утяжеления исходного

сбалансированного установившегося режима, произведенных в программе RastWin3 или других аналогичных, до нарушения сходимости итерационного процесса расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При формировании уравнений электрического режима их записывают в виде баланса мощностей в полярной системе координат. Тогда уравнения режима, записанные для активной (1) и реактивной мощности (2) в узлах, могут быть представлены в следующем виде [1]:

$$\Delta P_i(P, U, \delta) = P_i + U_i^2 g_{ii} - U_i \sum_{j=1}^k U_j (g_{ij} \cos(\delta_{ij}) - b_{ij} \sin(\delta_{ij})) = 0, \quad (1)$$

$$\Delta Q_i(Q_i, U, \delta) = Q_i + U_i^2 b_{ii} - U_i \sum_{j=1}^k U_j (b_{ij} \cos(\delta_{ij}) + g_{ij} \sin(\delta_{ij})) = 0, \quad (2)$$

где: $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$; $U_i, \delta_i, U_j, \delta_j$ – модули и фазы напряжений в узлах, кВ и град;

Q_i, P_i – мощности потребителей, Мвар и МВт;

g_{ii}, b_{ii} – действительная и мнимая части собственной проводимости узла;

g_{ij}, b_{ij} – действительная и мнимая части взаимной проводимости узлов;

k – общее число узлов с неизвестными напряжениями, балансирующих и базисных.

Задача расчёта предельных режимов сводится к задаче расчёта СУ (в общем случае рассчитывается и динамическая устойчивость).

Для начала обозначим, что такое статическая устойчивость. Статическая устойчивость (СУ) – это способность системы возвращаться к исходному состоянию после малого возмущения. Обеспечение СУ является априорным требованием, которое предъявляется к электроэнергетической системе.

Перетоки мощности подразделяются на нормальные и вынужденные.

При максимально допустимых протекают наибольшие допустимые перетоки, а в случае превышения – аварийно допустимые.

Для обеспечения СУ при утяжелении режима необходимо учитывать изменения внешних условий, возможные ограничения, связанные с безопасностью и надежностью системы.

Таблица 1. Нормативные запасы по СУ

	Нормальный режим, %	Утяжеленный режим, %	Вынужденный режим, %
Запас по активной мощности, $K_{зан}$	20	8	8

Допускается определять величину амплитуды нерегулярных колебаний активной мощности в полном контролируемом сечении по формуле:

$$\Delta P_{нк} = K \sqrt{\frac{P_{н1} \cdot P_{н2}}{P_{н1} + P_{н2}}}, \quad (4)$$

где:

$P_{н1}, P_{н2}$ – активная мощность потребления энергосистемы (части энергосистемы, совокупности энергосистем) с каждой из сторон контролируемого сечения (МВт);

K – коэффициент, характеризующий способ регулирования перетока активной мощности в контролируемом сечении

Для предотвращения потенциальных проблем, стабильной и надежной работы системы необходимо производить анализ, моделирование и контроль влияния утяжеления на работу системы как до изменения системы, так и после. Такой анализ позволяет спрогнозировать то, как на СУ могут повлиять изменения внешних условий или параметров системы, что позволит учесть возможные резервы мощности. В учебном пособии Ерошенко С. А. приводится мысль о том, что основным инструментом анализа статической аperiodической устойчивости энергосистемы является анализ перетоков мощности по связям в сечениях [3].

При ведении электрического режима должен обеспечиваться необходимый запас СУ, в работе Ерошенко С. А. представлена формула коэффициента запаса (3) K_p , которая определяется в виде:

$$K_p = \frac{P_{пред} - (P - \Delta P_{нк})}{P_{пред}}, \quad (3)$$

где:

$P_{пред}$ – предельный переток активной мощности в сечении по условию СУ;

P – переток активной мощности в сечении для рассматриваемого режима (положительное число);

$\Delta P_{нк}$ – нерегулярная амплитуда колебаний перетока активной мощности в сечении [2].

Нормативные запасы по СУ представлены в таблице 1.

($\sqrt{\text{МВт}}$). При оперативном регулировании перетока активной мощности в контролируемом сечении значение коэффициента K должно приниматься равным 1,5.

Тогда в соответствии с таблицей 1 и выражением для определения амплитуды нерегулярных колебаний получим следующие выражения для определения дальнейшего аварийно допустимого перетока и определения максимально допустимого перетока:

$$P_{АДП} = P_{пред} \cdot (1 - K_{зан}) - \Delta P_{нк} = 0,92 \cdot P_{пред} - \Delta P_{нк}, \quad (5)$$

$$P_{МДП} = P_{пред} \cdot (1 - K_{зан}) - \Delta P_{нк} = 0,8 \cdot P_{пред} - \Delta P_{нк}. \quad (6)$$

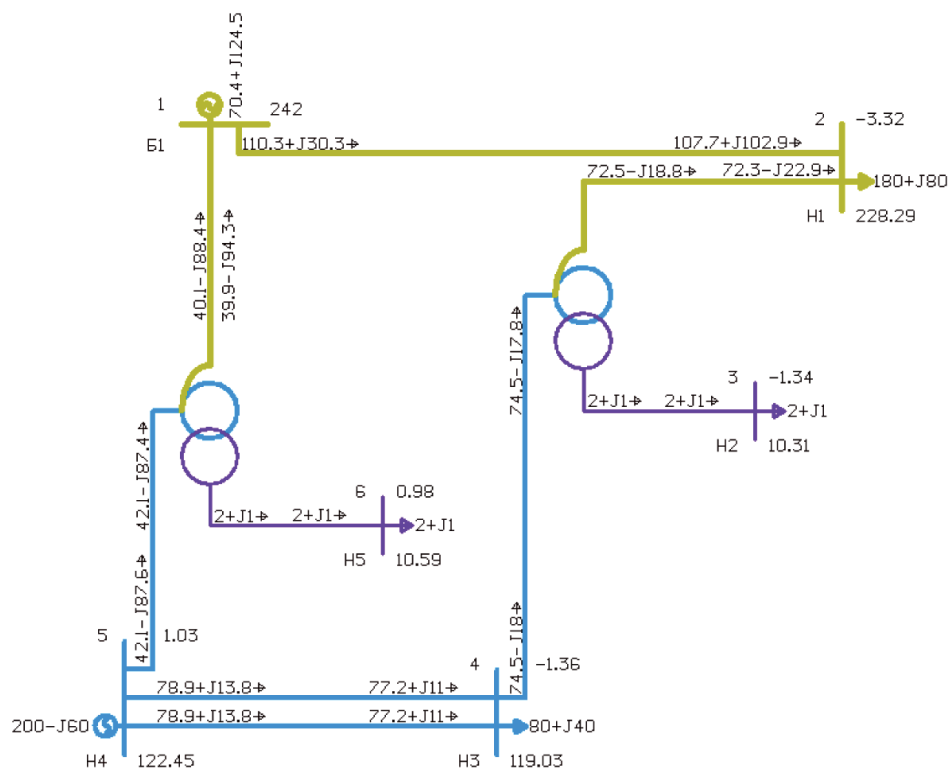


Рисунок 1. Структурная схема до утяжеления

	О	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Терп...
1			База	1	Б1	242					70,4	124,5					242,00		
2			Нагр	2	Н1	220			180,0	80,0							228,29	-3,32	
3			Нагр	3	Н2	10			2,0	1,0							10,31	-1,34	
4			Нагр	4	Н3	110			80,0	40,0							119,03	-1,36	
5			Ген	5	Н4	110					200,0	-60,0	120,0	-60,0	80,0		122,45	1,03	
6			Нагр	6	Н5	10			2,0	1,0							10,59	0,98	
7			Нагр	7	Т1	220											226,06	-1,24	
8			Нагр	8	Т2	220											232,17	1,07	

Рисунок 2. Таблица узлов до утяжеления

	О	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	ID...	Название	R	X	B	Кт/г	N_анц	БД...	P_нач	Q_нач	Na	I max	I загр.
1			ЛЭП	1	2			Б1 - Н1	7,84	34,32	-1 499,2				-110	-30		377	
2			Тр-р	2	7			Н1 - Т1	0,22	25,81	23,5	1,000			72	-23		192	30,5
3			Тр-р	7	3			Т1 - Н2	0,22	44,86		0,046			-2	-1		6	
4			Тр-р	7	4			Т1 - Н3	0,22	-1,46		0,526			74	-18		196	16,4
5			ЛЭП	4	5			Н3 - Н4	3,96	8,40	-54,0				77	11		378	
6			ЛЭП	4	5			Н3 - Н4	3,96	8,40	-54,0				77	11		378	
7			Тр-р	8	6			Т2 - Н5	0,22	44,86		0,046			-2	-1		6	
8			Тр-р	8	5			Т2 - Н4	0,22	-1,46		0,526			42	-87		241	20,2
9			Тр-р	1	8			Б1 - Т2	0,22	25,81	23,5	1,000			40	-94		244	38,9

Рисунок 3. Таблица ветвей до утяжеления

Предельный переток активной мощности определяется как результат утяжеления исходного установившегося режима.

Утяжеление режима может быть достигнуто путем изменения параметров системы или процесса в соответствии с требуемой траекторией. При этом важно следить за сходимостью итерационного процесса после расчета

установившихся режимов, чтобы определить, был ли достигнут предельный режим. Дополнительным критерием в определении предельного перетока активной мощности является не только учет изменения параметров режима, но и проверка соответствия техническим ограничениям.

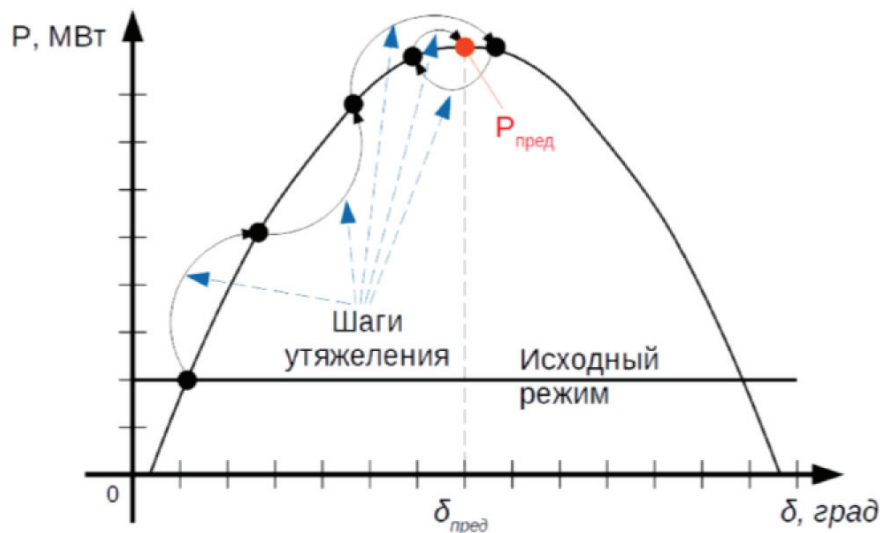


Рисунок 4. Таблица ветвей до утяжеления

В процессе утяжеления также важно учитывать возможные ограничения, связанные с безопасностью и надежностью системы. Следует проводить анализ влияния утяжеления на работу системы во избежание дальнейших потенциальных проблем. Кроме того, при утяжелении режима необходимо учитывать возможные изменения внешних условий, таких как изменение нагрузки или возможные аварийные ситуации. Это поможет предотвратить

непредвиденные последствия утяжеления режима. Итак, утяжеление режима является важным процессом, который требует внимательного анализа и контроля. Правильное выполнение утяжеления позволит обеспечить стабильную и надежную работу системы в различных условиях.

Рассмотрим графическое представление процесса утяжеления режима в программе RastrWin3.

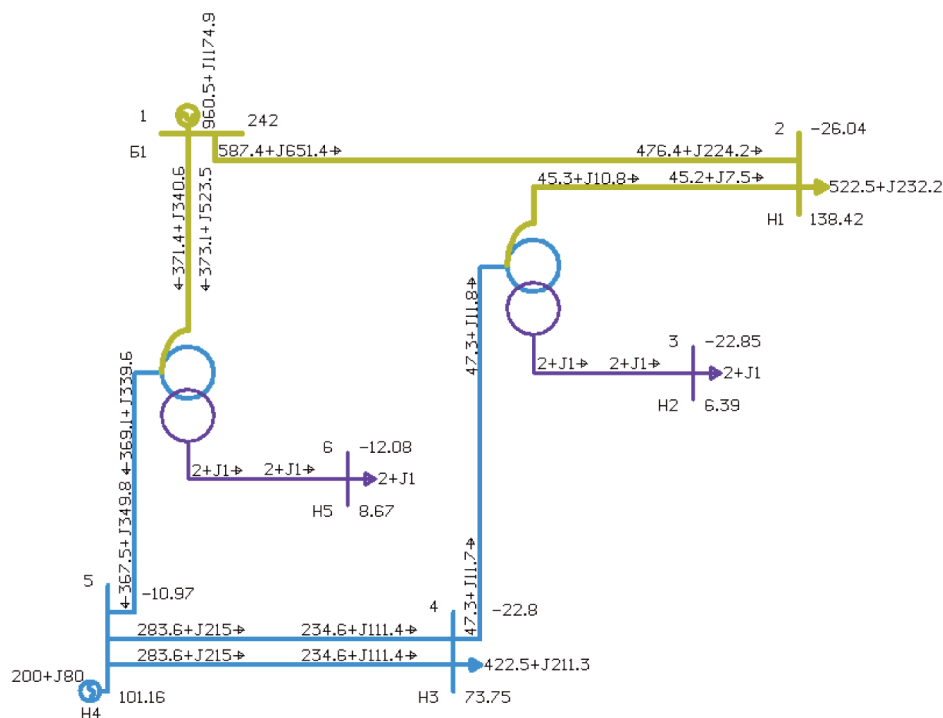


Рисунок 5. Структурная схема после утяжеления

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Терр...
1	☐		База	1	Б1	242					960,5	1 174,9					242,00		
2	☐		Нагр	2	H1	220			522,5	232,2							138,42	-26,04	
3	☐		Нагр	3	H2	10			2,0	1,0							6,39	-22,85	
4	☐		Нагр	4	H3	110			422,5	211,3							73,75	-22,80	
5	☐		Ген+	5	H4	110					200,0	80,0	120,0	-60,0	80,0		101,16	-10,97	
6	☐		Нагр	6	H5	10			2,0	1,0							8,67	-12,08	
7	☐		Нагр	7	T1	220											140,23	-22,59	
8	☐		Нагр	8	T2	220											190,08	-11,93	

Рисунок 6. Таблица узлов после утяжеления

	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	ID...	Название	R	X	B	Kt/r	N_анц	БД...	P_нач	Q_нач	Na	I max	I загр.
1	☐		ЛЭП	1	2			Б1 - H1	7,84	34,32	-1 499,2			0	-587	-651	0	2 196	
2	☐		Тр-р	2	7			H1 - T1	0,22	25,81	23,5	1,000		0	45	8	0	191	30,4
3	☐		Тр-р	7	3			T1 - H2	0,22	44,86		0,046		0	-2	-1	0	9	0,1
4	☐		Тр-р	7	4			T1 - H3	0,22	-1,46		0,526		0	47	12	0	201	16,8
5	☐		ЛЭП	4	5			H3 - H4	3,96	8,40	-54,0			0	235	111	0	2 033	
6	☐		ЛЭП	4	5			H3 - H4	3,96	8,40	-54,0			0	235	111	0	2 033	
7	☐		Тр-р	8	6			T2 - H5	0,22	44,86		0,046		0	-2	-1	0	7	
8	☐		Тр-р	8	5			T2 - H4	0,22	-1,46		0,526		0	-369	-340	0	1 523	127,6
9	☐		Тр-р	1	8			B1 - T2	0,22	25,81	23,5	1,000		0	-373	-523	0	1 534	244,1

Рисунок 7. Таблица ветвей после утяжеления

Для расчета активной мощности, передаваемой через контролируемое сечение, используем формулы 5 и 6: $P_{\text{АДП}} = 0,92 \cdot 587 = 540,04$, $P_{\text{МДП}} = 0,8 \cdot 587 = 469,6$.

Полученные величины перетоков активной мощности в контролируемом сечении запишем в таблицу 2.

Таблица 2. Величины перетоков активной мощности в контролируемом сечении

	Р _{пред} , МВт	Р _{АДП} , МВт	Р _{МДП} , МВт
Переток	587	540,04	469,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Был произведен анализ статической аperiodической устойчивости, по результатам которого значение аварийно допустимого перетока в исследуемой схеме равняется 540,04 МВт, а максимально допустимого перетока будет равняться 469,6 МВт. Для увеличения пропускной способности в энергосистеме можно реализовать такие мероприятия, как возведение новых линий или увеличение сечения проводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин, В. Г. Неуймин ; под ред. П. И. Бартоломея. – Москва : Флинта : Наука, 2008. – 256 с.
2. Особенности определения аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / А. С. Шишкина, М. А. Сугоровский, А. И. Пухова, И. В. Игнатенко // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи

с международным участием (Хабаровск, 20–23 апреля 2021 г.). – Хабаровск, 2021. – С. 9–13.

3. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах : учебное пособие / С. А. Ерошенко, А. О. Егоров, В. О. Самойленко, А. И. Хальясмаа. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2017. – 88 с. – ISBN 978-5-7996-1994-7.
4. Шепелев, А. О. Анализ температурной зависимости активных противодействий на коммутационной мощности в электроэнергетических комплексах / А. О. Шепелев, Е. Ю. Шепелева, С. Ю. Швецов. – DOI 10.18822/byusu20240241-46 // Вестник Югорского государственного университета. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 41–46.