

Исследование устойчивости объединенных энергосистем на основе структурного подхода.

М.Г. ПОПОВ, Е.В.ЗАХАРОВА

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Россия
z_e_zakh@mail.ru**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Статическая колебательная устойчивость, демпфирование низкочастотных колебаний, режимы энергосистем, обменная мощность, характеристические корни дифференциальных уравнений.

1 ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие электроэнергетических систем характеризуется тенденцией увеличения и концентрации энергопотребления в крупных городах при слабой пропускной способности электрической сети. В сложившихся обстоятельствах возросла проблема обеспечения надежного электроснабжения, которая частично может быть решена созданием кольцевых схем питания, что, в свою очередь, в значительной мере осложняет задачу прогнозирования и управления режимами работы таких энергосистем.

Прогноз и оценка допустимости режимов выполняется при исследовании задачи устойчивости электрической сети, сложность и трудоемкость которой обусловлена многообразием схемно-режимных условий. При этом, в зависимости от постановки используются динамические или статические (линеаризованные) модели электроэнергетических систем [1], математическое описание которых реализуется в современных программных комплексах (Eurostag, Mustang, RastrWin).

Решение этой нетривиальной задачи сводится к поиску предельных режимов по передаваемой (обменной) мощности объединенных энергосистем и обеспечению нормированных запасов по устойчивости энергосистем. Здесь следует отметить об известной проблеме достоверного определения нормативных запасов по устойчивости, обусловленных в значительной степени адекватностью математического описания обобщенной нагрузки и силового электрооборудования электроэнергетической системы. В связи с этим оценка запасов устойчивости даже при использовании полных моделей носит эмпирический (приближенный) характер [2]. Естественным будет понимание того, что поиск области потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов, определяемых структурой ЭЭС, может быть осуществлен с привлечением упрощенных моделей [3,4], не решая при этом задачи оптимизации (координации) настроек систем автоматического управления.

Координация настроек АРВ выполняется независимо, с целью некоторого увеличения предела по передаваемой мощности. Однако, как показала практика многочисленных исследований [3], оптимизация структуры управления возбуждением особенно эффективна в ОЭС, обладающих “жесткими” межсистемными связями. Более того, в особо тяжелых случаях имеет место вырождение области устойчивости, отвечающей заданным критериям оптимизации.

Целью данного исследования является поиск критериев, основанных на демпферных свойствах различных моделей энергосистем. При этом производится качественная оценка влияния моментов неконсервативных сил на устойчивость рассматриваемой энергосистемы

вблизи области аperiodической устойчивости. Формулируются некоторые обобщенные критерии, основанные на применении упрощенных математических моделей синхронных машин. Полученные критерии позволяют достоверно определять область потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Компьютерные исследования проводились применительно к расчетным схемам электропередачи, содержащим три (Г1, Г2, Г3) или пять (Г1, Г2, Г3, Г4 и Г5) эквивалентных энергосистем. Направление потока обменной мощности (см. рис. 1) задавалось снижением объема генерации в приемной части ОЭС при сбалансированной нагрузке промежуточных эквивалентных энергосистем (Г2 и др.). На рисунке 1 представлен режим, соответствующий физически осуществимому, все параметры указаны в приведенных единицах по отношению к $S_{баз}=10000$ МВА.

Номинальные параметры эквивалентных генераторов Г1,...,Г5: $\cos\varphi_{ном}=0,85$; $x_d=x_q=2,00$; $x_s=0,13$; $x_{fs}=0,16$; $x_{srd}=0,17$; $x_{srq}=0,08$; $x'_d=0,28$; $x''_d=x''_q=0,21$; $T_J=5,95$; $T_{d0}=7,00$; $T_{rd}=0,50$ с; $T_{rq}=0,50$ с. Установленные мощности были приняты соответственно $P_{ном}^{(Г1)}=0,25 \cdot S_{баз}$; $P_{ном}^{(Г2)}=P_{ном}^{(Г3)}=P_{ном}^{(Г4)}=P_{ном}^{(Г5)}=0,5 \cdot S_{баз}$.

Во всех режимах нагрузка моделировалась шунтами постоянной проводимости с нормированным $\cos\varphi_{ном}=0,92...0,93$. Для упрощенного представления генераторов использовались позиционная модель $\Psi_f = \text{const}$ и модель без АРВ $U_f = \text{const}$. Поиск структурных критериев осуществлялся сопоставлением границ области устойчивости, полученных при использовании упрощенных и полных моделей со средневзвешенными (неоптимальными) настройками АРВ-ПД и АРВ-СД.

Параметры систем возбуждения с АРВ-ПД принимались равными: $k_{0u}=20$ ед.возб.ном./ед.напр.стат.; $k_{0c}=2,0$ дел.; $T_b=0,3$ с; $T_{oc}=0,1$ с. Для АРВ-СД было принято соответственно: $k_{0u}=50$ ед.возб.ном./ед.напр.стат.; $k_{1u}=5,0$ дел.; $k_{0\omega}=2,0$ дел.; $k_{1\omega}=5,0$ дел.; $k_{1if}=2,0$ дел.

Оценка устойчивости производилась при последовательном утяжелении режима работы электропередачи вплоть до физически осуществимого режима при анализе корней, отвечающих электромеханическому движению (см. табл. 2, 3). Во всех рассмотренных случаях нарушение колебательной устойчивости происходит до достижения физически осуществимого режима. Для расчетных схем, включающих пять эквивалентных энергообъединений (Г1, Г2, Г3, Г4 и Г5) предел передаваемой мощности располагается в непосредственной близости максимума угловой характеристики (см. рис. 3). При этом введение интенсивного управления с неоптимальной настройкой регуляторов позволяет расширить границу области колебательной устойчивости вплоть до физически осуществимых режимов ($\gamma_{отн}=189,64^\circ$). Предельные режимы, рассчитываемые с применением упрощенных моделей отвечают недопустимым запасом (около 1%) по устойчивости (см. рис. 2). При этом модели $U_f = \text{const}$ отвечает максимум угловой характеристики.

При средневзвешенных настройках АРВ-СД граница области устойчивости находится в зоне искусственной устойчивости ($\gamma_{отн}=189,64^\circ$). Следует отметить, что усиление стабилизации не приводит к существенному увеличению предела по передаваемой мощности.

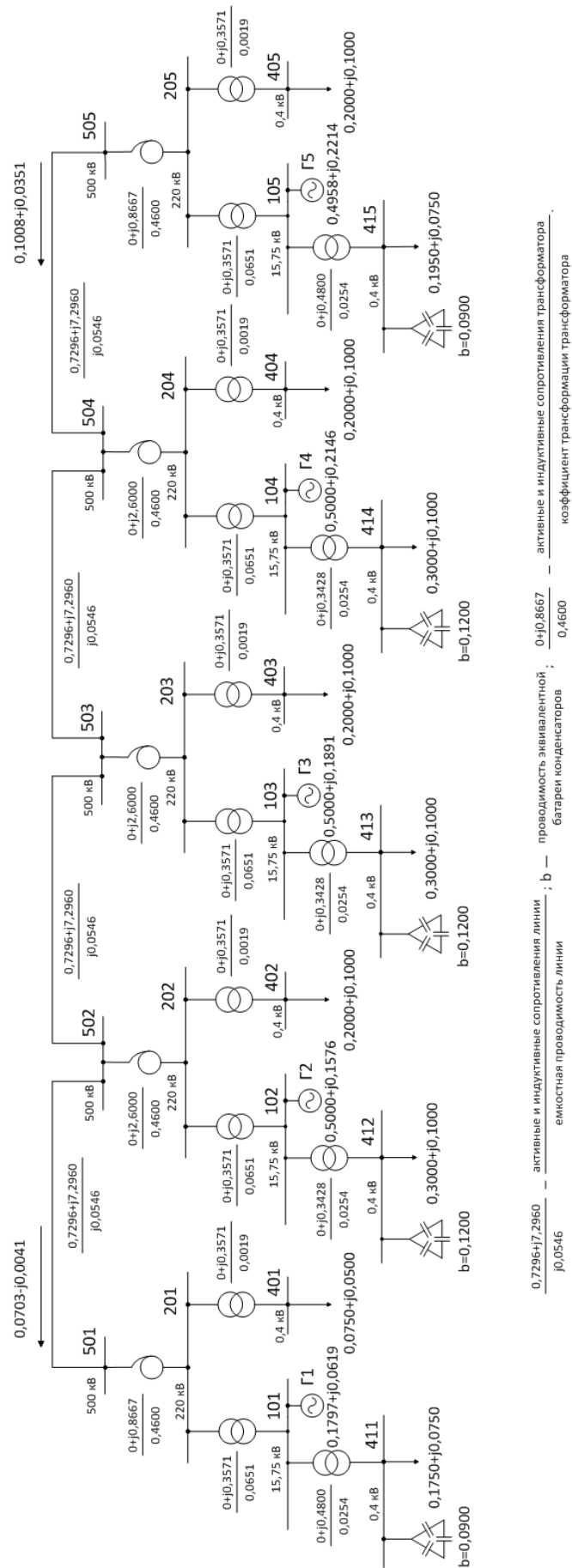


Рис. 1: Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы.

	Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи, градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $E'_q = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД
				без д.к.	д.к. в оси d, q	д.к. в оси d, q
$P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	0,98/119,48° (физически осуществимый)	2,0	+0,688;-0,688 0±j0,469	+0,472±j0,125 -0,121±j0,468	+1,056;-1,294 -0,239±j,480	+0,859;-0,624 -0,436±j0,345
	0,99/116,43° ($\Psi_f = \text{const}$)	1,0	0±j0,007 0±j0,484	+0,364±j0,140 -0,117±j0,482	+0,843;-1,057 -0,191±j0,494	+0,685;-0,539 -0,449±j0,354
	1,00/105,09° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	0,0	0±j0,212 0±j0,537	-0,001±j0,217 -0,110±j0,535	+0,013±j0,361 -0,074±j0,545	-0,081±j0,102 -0,503±j0,386
$P^{(1)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	0,98/120,62° (физически осуществимый)	2,0	+1,316;-1,316 0±j0,394	+0,765±j0,034 -0,206±j0,395	+1,120;-1,204 -0,513±j0,395	+0,718;-0,521 -0,346±j0,308
	1,00/106,62° ($\Psi_f = \text{const}$)	0,0	0±j0,001 0±j0,456	+0,328±j0,090 -0,178±j0,456	+0,229±j0,121 -0,180±j0,445	-0,040±j0,092 -0,399±j0,349
	1,00/100,86° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	0,0	0±j0,137 0±j0,479	-0,001±j0,128 -0,171±j0,479	+0,247±j0,165 -0,125±j0,472	-0,089±j0,131 -0,420±j0,364
$P^{(1)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(3)} = S_{\text{баз}}$	0,98 / 117,02° (физически осуществимый)	2,0	0±j0,195 0±j0,411	+0,380±j0,216 -0,224±j0,414	+0,359±j0,372 -0,437±j0,437	+0,603;-0,496 -0,372±j0,314
	0,98/89,27° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	2,0	0±j0,292 0±j0,509	-0,001±j0,290 -0,167±j0,509	+0,075±j0,386 -0,105±j0,508	-0,129±j0,135 -0,458±j0,375
$P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(3)} = S_{\text{баз}}$	0,98/115,70° (физически осуществимый)	2,0	+0±j0,222 0±j0,502	+0,270±j0,242 -0,111±j0,501	+0,129±0,390 -0,161±j0,511	+0,686;-0,564 -0,480±j0,365
	0,99/93,86° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	1,0	0±j0,318 0±j0,578	-0,001±j0,318 -0,100±j0,577	+0,060±j0,396 -0,048±j0,587	-0,139±j0,128 -0,569±j0,415

Табл. 1: Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения в различных моделях ЭЭС.

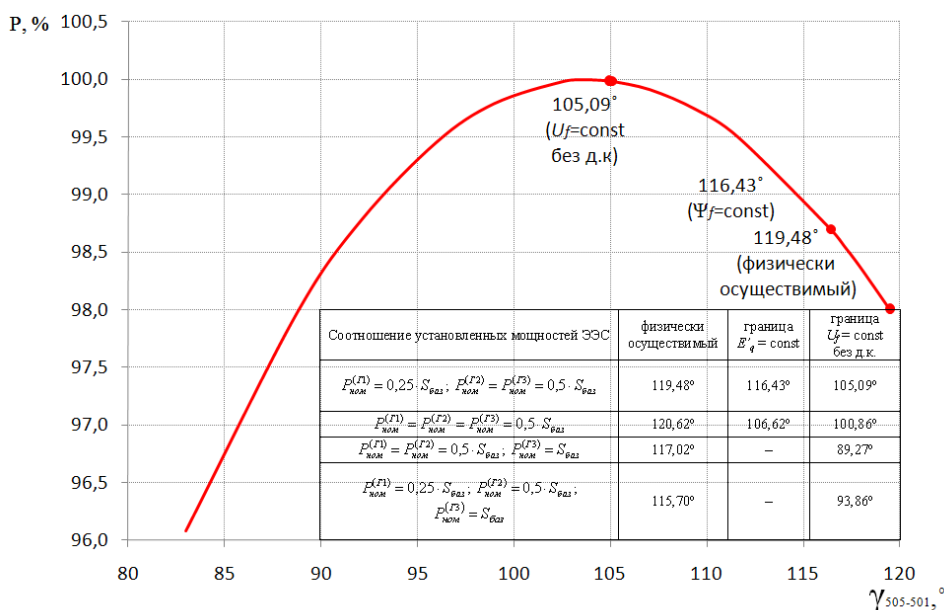


Рис. 2: Предельная передаваемая мощность при упрощенном представлении трех энергосистем.

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Екатеринбург, 3 – 7 июня 2013 г.**

	Обменная мощность в сечении 501 - 502, о.е./ угол электропередачи, градус	Запас мощности в сечении 501 - 502, %	Позиционная модель ЭЭС $E'_q = \text{const}$	Нерегулируемая ЭЭС $U_f = \text{const}$	АРВ-ПД	АРВ-СД
				без д.к.	д.к. в оси d, q	д.к. в оси d, q
$P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = P^{(3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(4)} = P^{(5)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}$	0,97 / 189,64° (физически осуществимый)	3,0	+1,062±j0,250 -1,062±j0,250 0±j0,477 0±j0,676	+1,174±j0,238 -0,998±j0,276 -0,190±j0,477 -0,123±j0,675	+0,880;-1,029 +0,816±j0,312 +0,078±j0,671 -0,014±j0,472	+0,687;-0,504 -0,227±j0,219 -0,403±j0,338 -0,683±j0,457
	0,98 / 145,65° ($\Psi_f = \text{const}$)	2,0	0±j0,355 0±j0,356 0±j0,558 0±j0,693	+0,139±j0,308 -0,379±j0,398 -0,193±j0,557 -0,126±j0,692	+0,154±j0,147 +0,505±j0,381 +0,078±j0,687 -0,023±j0,549	-0,098±j0,130 -0,353±j0,316 -0,492±j0,410 -0,708±j0,471
	0,97 / 135,74° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	3,0	0±j0,326 0±j0,425 0±j0,574 0±j0,703	-0,001±j0,316 -0,289±j0,431 -0,193±j0,573 -0,128±j0,703	+0,146±j0,165 +0,423±j0,391 +0,084±j0,696 -0,016±j0,565	-0,127±j0,150 -0,376±j0,333 -0,510±j0,422 -0,721±j0,477
	0,98 / 191,26° (физически осуществимый)	3,0	+0,945±j0,207 -0,945±j0,207 0±j0,435 0±j0,563	+1,145±j0,201 -0,817±j0,246 -0,175±j0,434 -0,148±j0,562	+0,902;-1,012 +0,703±j0,292 -0,091±j0,430 -0,016±j0,591	+0,671;-0,492 -0,200±j0,205 -0,367±j0,322 -0,513±j0,411
	0,99 / 153,12° ($\Psi_f = \text{const}$)	1,0	0±j0,296 0±j0,297 0±j0,517 0±j0,586	+0,315±j0,244 -0,377±j0,346 -0,172±j0,517 -0,156±j0,585	+0,166±j0,127 +0,490±j0,349 -0,058±j0,512 -0,013±j0,583	-0,064±j0,107 -0,302±j0,284 -0,454±j0,388 -0,540±j0,433
	0,94 / 128,00° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	6,0	0±j0,275 0±j0,419 0±j0,559 0±j0,611	-0,001±j0,269 -0,222±j0,420 -0,167±j0,558 -0,160±j0,610	+0,144±j0,171 +0,287±j0,374 -0,030±j0,554 -0,006±j0,605	-0,129±j0,153 -0,355±j0,324 -0,499±j0,417 -0,569±j0,452
	0,98 / 182,29° (физически осуществимый)	2,0	+0,839±j0,261 -0,839±j0,261 0±j0,464 0±j0,583	+0,960±j0,249 -0,779±j0,285 -0,164±j0,463 -0,157±j0,583	+0,656;-0,891 +0,678±j0,325 -0,025±j0,463 -0,047±j0,580	+0,613;-0,487 -0,203±j0,195 -0,395±j0,332 -0,535±j0,424
	0,97 / 135,08° ($\Psi_f = \text{const}$)	3,0	0±j0,334 0±j0,335 0±j0,539 0±j0,609	+0,221±j0,290 -0,332±j0,375 -0,167±j0,538 -0,163±j0,608	+0,045±j0,125 +0,448±j0,374 +0,001±j0,603 -0,021±j0,534	+0,076±j0,103 -0,315±j0,278 -0,477±j0,391 -0,566±j0,447
	0,90 / 112,67° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	10,0	0±j0,291 0±j0,428 0±j0,569 0±j0,627	-0,001±j0,285 -0,207±j0,429 -0,167±j0,568 -0,165±j0,627	+0,058±j0,156 +0,264±j0,385 +0,007±j0,621 -0,006±j0,564	-0,117±j0,135 -0,353±j0,307 -0,510±j0,413 -0,588±j0,461
$P^{(1)} = 0,25 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(2)} = P^{(3)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}};$ $P^{(4)} = 0,5 \cdot S_{\text{баз}}; P^{(5)} = S_{\text{баз}}$	0,98 / 180,47° (физически осуществимый)	2,0	+0,758±j0,271 -0,758±j0,271 0±j0,501 0±j0,674	+0,881±j0,255 -0,726±j0,300 -0,163±j0,500 -0,112±j0,673	+0,649;0,890 +0,665±j0,333 +0,018±j0,676 -0,010±j0,498	+0,613;-0,490 -0,232±j0,211 -0,435±j0,356 -0,697±j0,476
	0,99 / 143,55° ($\Psi_f = \text{const}$)	1,0	0±j0,341 0±j0,343 0±j0,554 0±j0,684	+0,236±j0,296 -0,344±j0,385 -0,168±j0,553 -0,114±j0,683	+0,005±j0,114 +0,464±j0,380 +0,017±j0,687 -0,010±j0,548	-0,066±j0,092 -0,332±j0,285 -0,498±j0,401 -0,714±j0,485
	0,93 / 121,20° ($U_f = \text{const}$ без д.к.)	7,0	0±j0,300 0±j0,444 0±j0,584 0±j0,704	-0,001±j0,295 -0,211±j0,445 -0,170±j0,584 -0,118±j0,703	+0,029±j0,153 +0,265±j0,393 +0,026±j0,704 -0,001±j0,578	-0,117±j0,133 -0,376±j0,318 -0,534±j0,425 -0,744±j0,497

Табл. 2: Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения в различных моделях ЭЭС

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сопоставительного анализа рассчитанных границ области устойчивости показана необходимость применения упрощенных моделей, позволяющих выполнить первичную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем. Упрощенное представление энергосистем в виде постоянства потокосцеплений контуров ротора ($\Psi_f = \text{const}$) с большей степенью характеризует искомую границу колебательной

устойчивости. Применение модели $U_f = \text{const}$ может быть оправдано лишь для энергообъединений с межсистемными связями малой и средней протяженности (до 1200 ... 1500 км)

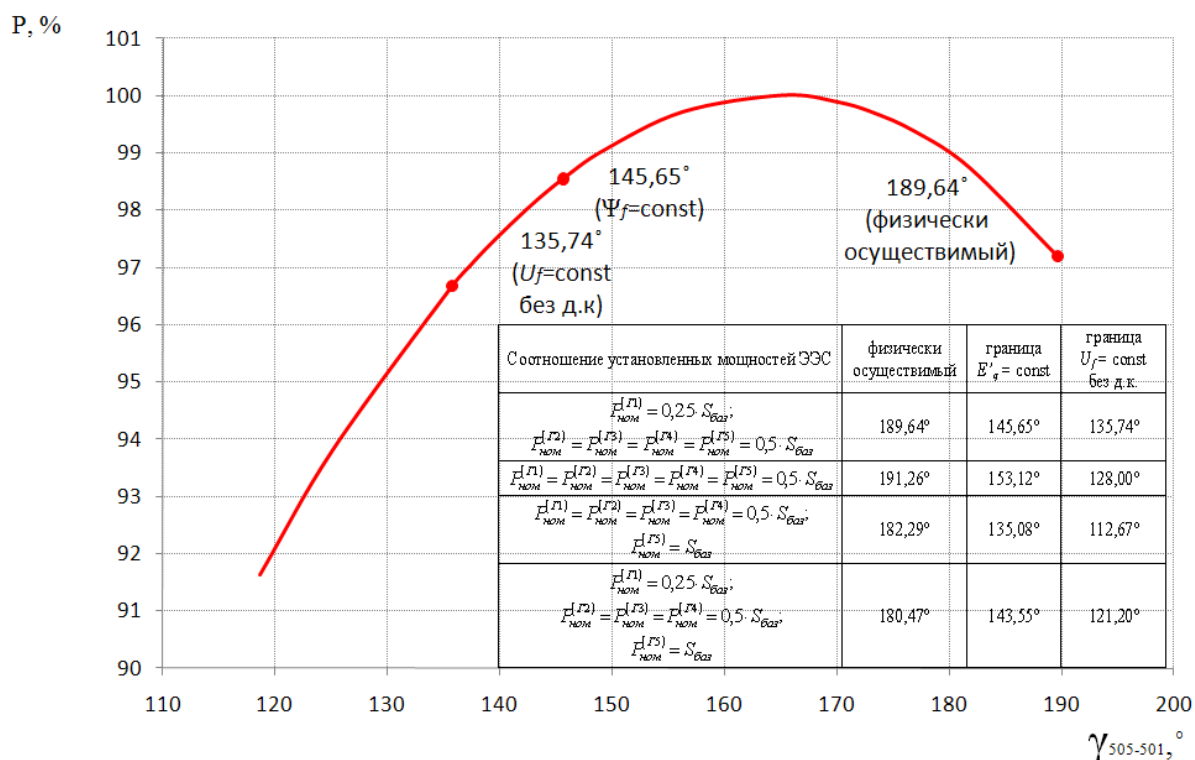


Рис. 3: Предельная передаваемая мощность при упрощенном представлении пяти энергосистем.

Показано, что во всех рассмотренных случаях нарушение колебательной устойчивости происходит до границы области апериодической устойчивости. Граница области потенциально устойчивых (стабилизируемых) в колебательном отношении режимов объединенных энергосистем отвечает их позиционному представлению. При введении интенсивного управления со средневзвешенными (неоптимальными) настройками регуляторов возбуждения синхронных машин система является стабилизируемой во всей области потенциально устойчивых режимов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов ; Под ред. Л.А. Жукова — Москва : Энергия, 1979 .— 455 с.
- [2] Методические указания по устойчивости энергосистем. Утв. Приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 277
- [3] Рагозин А.А. Обобщенный анализ динамических свойств энергообъединений на основе структурного подхода: автореф. дис. д-ра техн. наук. — СПб: СПбГТУ, 1998 .— 39 с.
- [4] Попов М.Г. Развитие методов и программного обеспечения исследований динамических свойств электроэнергетических систем: автореф. дис. канд. техн. наук. — СПб: СПбГТУ, 2001 – 16 с.