

УДК 621.311.1.016

М.Г. Попов, Е.В. Захарова

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО ПОДХОДА

M.G. Popov, E.V. Zakharova

STABILITY STUDY OF POWER GRIDS BASED ON STRUCTURED APPROACH

Цель исследования — получить критерии, основанные на демпферных свойствах различных моделей энергосистем. Производится качественная оценка влияния демпферных моментов на устойчивость рассматриваемой энергосистемы вблизи области апериодической устойчивости. Формулируются некоторые обобщенные критерии, основанные на применении упрощенных математических моделей синхронных машин. Полученные критерии позволяют достоверно определять область потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов.

СТАТИЧЕСКАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. ДЕМПФИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ. РЕЖИМЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ. ОБМЕННАЯ МОЩНОСТЬ. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ КОРНИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.

This paper discusses some complex regimes of electric network with various interchange power. Results of modeling of power grids are presented. Questions of modeling of generators, transformers and power lines are considered.

The object of this research is generalized criterion. That criterion based on various damper properties of power grids models. Study contains qualitative assessment of damper moments. Generalized criteria based on simplified mathematical models of synchronous machines. These criteria allow detecting stability range of power settings. Research contains a lot of solutions of differential equations and root values are presented graphically in order to monitor the system state. Electromechanical transients are described linearized differential equation system in different power settings.

ELECTRICAL POWER SYSTEM STABILITY. OSCILLATION DAMPING. POWER SETTINGS. INTERCHANGE POWER. SOLUTION OF DIFFERENTIAL EQUATION.

Для развития российских электроэнергетических систем на современном этапе характерны тенденции увеличения и концентрации энергопотребления в крупных городах при слабой пропускной способности электрической сети. В связи с этим обострилась 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) математические модели электроэнергетических систем [1], которые реализуются в современных программных комплексах (Eurostag, Mustang, RastrWin).

Решение этой нетривиальной задачи сводится к поиску режимов, предельных по передаваемой (обменной) мощности объединенных энергосистем и обеспечению нормированных запасов по устойчивости энергосистем. Здесь следует отметить известную проблему достоверного определения нормативных запасов по устойчивости, обусловленную в значительной мере степенью адекватности математического описания обобщенной нагрузки и силового электрооборудования электроэнергетической системы. Оценка запасов устойчивости даже при использовании полных моделей носит эмпири-

ческий (приближенный) характер [2]. Поиск области потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов, определяемых структурой ЭЭС, может быть осуществлен с привлечением упрощенных моделей [3, 4] без решения при этом задачи оптимизации (координации) настроек систем автоматического управления.

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

Цель нашего исследования — поиск критериев, основанных на демпферных свойствах различных моделей энергосистем. При этом производится качественная оценка влияния моментов неконсервативных сил на устойчивость рассматриваемой энергосистемы вблизи области апериодической устойчивости. Формулируются некоторые обобщенные критерии, основанные на применении упрощенных математических моделей синхронных машин. Полученные критерии позволяют достоверно определять область потенциально устойчивых (стабилизируемых) режимов.

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 (рис. 1) задавалось снижением объема генерации в приемной части ОЭС при сбалансированной нагрузке промежуточных эквивалентных энергосистем (Г2 и др.). На рис. 1 представлен режим, соответствующий физически осуществимому; все параметры указаны в относительных единицах, приведенных к $S_{\text{баз}} = 10000$ МВА.

Номинальные параметры* эквивалентных генераторов Г1–Г5: $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$; $x_d = x_q = 2,00$; $x_s = 0,13$; $x_{fs} = 0,16$; $x_{srd} = 0,17$; $x_{srq} = 0,08$ в о. е.; $x'_d = 0,28$ о. е.; $x''_d = x''_q = 0,21$ о. е.; $T_J = 5,95$ с; $T_{d0} = 7,00$ с; $T_{rd} = 0,50$ с; $T_{rq} = 0,50$ с. Установлен-

* В статье используются общепринятые в теории электрических систем обозначения параметров схем замещения и режимов синхронных генераторов.

ные мощности были приняты соответственно $P_{\text{ном Г1}} = 0,25 S_{\text{баз}}$; $P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} = P_{\text{ном Г4}} = P_{\text{ном Г5}} = 0,5 S_{\text{баз}}$.

Во всех режимах нагрузка моделировалась шунтами постоянной проводимости с нормированным $\cos\varphi_{\text{норм}} = 0,92-0,93$. 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 следующими: $k_{0u} = 20$ ед.возб. ном./ед.напр.стат.; $k_{0c} = 2,0$ дел.; $T_b = 0,3$ с; $T_{oc} = 0,1$ с. Для АРВ СД приняты: $k_{0u} = 50$ ед. возб.ном./ед.напр.стат.; $k_{1u} = 5,0$ дел.; $k_{0\omega} = 2,0$ дел.; $k_{1\omega} = 5,0$ дел.; $k_{1j\varphi} = 2,0$ дел.

Оценка устойчивости производилась при последовательном утяжелении режима работы электропередачи вплоть до физически осуществимого режима.

Проводился анализ корней, отвечающих электромеханическому движению (см. табл. 1, 2). Во всех рассмотренных случаях нарушение колебательной устойчивости происходит до достижения физически осуществимого режима.

Предельные режимы, рассчитываемые с применением упрощенных моделей, имеют недопустимый запас (около 1 %) по устойчивости (см. рис. 2 и табл. 1). При этом модели без АРВ ($U_f = \text{const}$) отвечает максимум угловой характеристики.

Для расчетных схем, включающих пять эквивалентных энергообъединений (Г1–Г5), предел передаваемой мощности располагается в непосредственной близости от максимума угловой характеристики (см. рис. 3 и табл. 2). При этом введение интенсивного управления с неоптимальной настройкой регуляторов позволяет расширить границу области колебательной устойчивости вплоть до физически осуществимых режимов ($\gamma_{\text{отн}} = 189,64^\circ$).

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

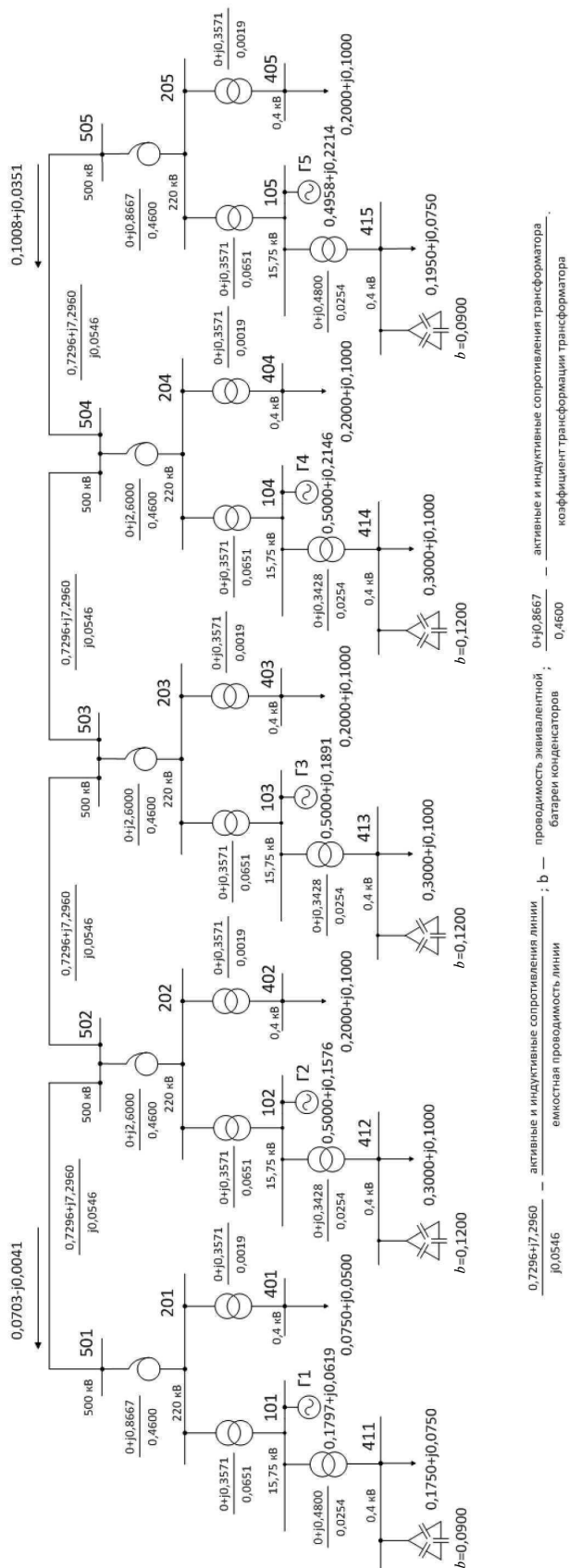


Рис. 1. Расчетная схема рассматриваемой энергосистемы

Таблица 1

**Углы $\gamma_{502-501}$ электропередачи
при разных соотношениях установленных мощностей генераторов в схеме с тремя ЭЭС**

Установленные мощности эквивалентных генераторов в схеме с тремя ЭЭС, о. е.	$\gamma_{502-501}$, град, в трех режимах		
	Физически осуществимый режим	Предел по устойчивости при $\psi_f = \text{const}$	Предел по устойчивости при $U_f = \text{const}$
$P_{\text{ном Г1}} = 0,25$ $P_{\text{ном Г1}} = P_{\text{ном Г3}} = 0,5$	119,48	116,43	105,09
$P_{\text{ном Г1}} = P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} = 0,5$	120,62	106,62	100,89
$P_{\text{ном Г1}} = P_{\text{ном Г2}} = 0,5;$ $P_{\text{ном Г3}} = 1,0$	117,02	–	89,27
$P_{\text{ном Г1}} = 0,25;$ $P_{\text{ном Г2}} = 0,5;$ $P_{\text{ном Г3}} = 1,0$	115,70	–	93,86

Таблица 2

**Углы $\gamma_{502-501}$ электропередачи
при разных соотношениях установленных мощностей генераторов в схеме с пятью ЭЭС**

Установленные мощности эквивалентных генераторов в схеме с пятью ЭЭС, о. е.	$\gamma_{502-501}$, град, в трех режимах		
	Физически осуществимый режим	Предел по устойчивости при $\psi_f = \text{const}$	Предел по устойчивости при $U_f = \text{const}$
$P_{\text{ном Г1}} = 0,25;$ $P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} = P_{\text{ном Г4}} =$ $= P_{\text{ном Г5}} = 0,5$	189,64	145,65	135,74
$P_{\text{ном Г1}} = P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} =$ $= P_{\text{ном Г4}} = P_{\text{ном Г5}} = 0,5$	191,26	153,12	128,00
$P_{\text{ном Г1}} = P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} =$ $= P_{\text{ном Г4}} = 0,5;$ $P_{\text{ном Г5}} = 1,0$	182,29	135,08	112,67
$P_{\text{ном Г1}} = 0,25;$ $P_{\text{ном Г2}} = P_{\text{ном Г3}} = P_{\text{ном Г4}} =$ $= 0,5;$ $P_{\text{ном Г5}} = 1,0$	180,47	143,55°	121,20°

Таблица 3

Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения при использовании различных моделей в схеме с тремя ЭЭС

Мощности трех эквивалентных генераторов, о. е.	Обменная мощность $P_{501-502}$, о. е. / Угол электропередачи $\gamma_{501-502}$, град, в сечении 501–502	Запас устойчивости по мощности в сечении 501–502, %	Корни характеристического уравнения, соответствующие механическому движению роторов, при использовании разных моделей ЭЭС			
			Позиционная модель ЭЭС ($\Psi_f = \text{const}$)	Нерегулируемая ЭЭС ($U_f = \text{const}$), экв. генераторы без ДК	Экв. генераторы с АРВ-ПД и с ДК в осях q, d	Экв. генераторы с АРВ СД и с ДК в осях q, d
$P_{\Gamma 1} = 0,25; P_{\Gamma 2} = 0,5; P_{\Gamma 3} = 0,5$	0,98/119,48°	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°	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
$P_{\Gamma 1} = 0,5; P_{\Gamma 2} = 0,5; P_{\Gamma 3} = 0,5$	0,98/120,62°	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°	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
$P_{\Gamma 1} = 0,5; P_{\Gamma 2} = 0,5; P_{\Gamma 3} = 1,0$	0,98 / 117,02°	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°	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
$P_{\Gamma 1} = 0,25; P_{\Gamma 2} = 0,5; P_{\Gamma 3} = 1,0$	0,98/115,70°	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°	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

Таблица 4

Характер изменения доминирующих составляющих относительного движения при использовании различных моделей в схеме с пятью ЭЭС

Задаваемый режим (генерируемые мощности, о.е.)	Обменная мощность, $P_{501-502}$, о.е. / угол $\gamma_{501-502}$ электропередачи, град.	Запас мощности в сечении 501–502, %	Корни характеристического уравнения, соответствующие механическому движению роторов, при использовании разных моделей ЭЭС			
			Позиционная модель ЭЭС ($\Psi_f = \text{const}$)	Нерегулируемая ЭЭС ($U_f = \text{const}$), генераторы без ДК	Генераторы с АРВ ПД и с ДК в осях q, d	Генераторы с АРВ СД и с ДК в осях q, d
$P_{\Gamma 1} = 0,25; P_{\Gamma 2} = P_{\Gamma 3} = 0,5; P_{\Gamma 4} = P_{\Gamma 5} = 0,5$	0,97 / 189,64°	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°	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°	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
$P_{\Gamma 1} = 0,5; P_{\Gamma 2} = P_{\Gamma 3} = 0,5; P_{\Gamma 4} = P_{\Gamma 5} = 0,5$	0,98 / 191,26°	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°	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°	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
$P_{\Gamma 1} = P_{\Gamma 2} = 0,5; P_{\Gamma 3} = P_{\Gamma 4} = 0,5; P_{\Gamma 5} = 1,0$	0,98 / 182,29°	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°	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°	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

Окончание табл. 4

Задаваемый режим (генерируемые мощности, о.е.)	Обменная мощность, $P_{501-502}$, о. е. / УГОЛ $\gamma_{501-502}$ электропередачи, град.	Запас мощности в сечении 501–502, %	Корни характеристического уравнения, соответствующие механическому движению роторов, при использовании разных моделей ЭЭС			
			Позиционная модель ЭЭС ($\Psi_f = \text{const}$)	Нерегулируемая ЭЭС ($U_f = \text{const}$), генераторы без ДК	Генераторы с АРВ ПД и с ДК в осях q, d	Генераторы с АРВ СД и с ДК в осях q, d
$P_{Г1} = 0,25; P_{Г2} = P_{Г3} = 0,5; P_{Г4} = 0,5; P_{Г5} = 1,0$	0,98 / 180,47°	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°	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°	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

Сопоставительный анализ рассчитанных границ области устойчивости показал необходимость применения таких упрощенных моделей, которые позволяют выполнить первичную оценку предельных по передаваемой мощности режимов энергосистем. Так, упрощенное представление энергосистем в виде постоянства потокосцеплений контуров ротора ($\Psi_f = \text{const}$) с большей степенью характеризует искомую

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

Показано, что во всех рассмотренных случаях нарушение колебательной устойчивости происходит до достижения границы области апериодической устойчивости. Граница области потенциально

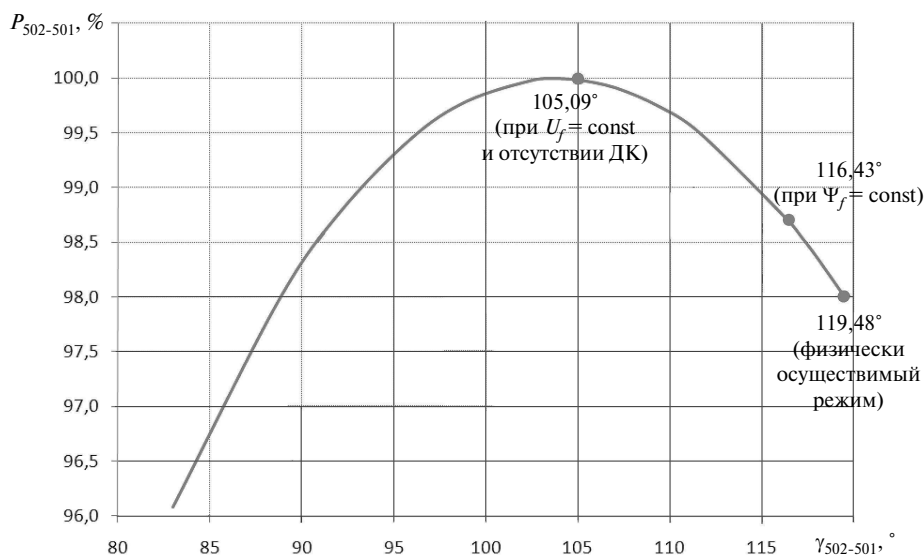


Рис. 2. Предельная передаваемая мощность в сечении 502–501 при упрощенном представлении трех энергосистем

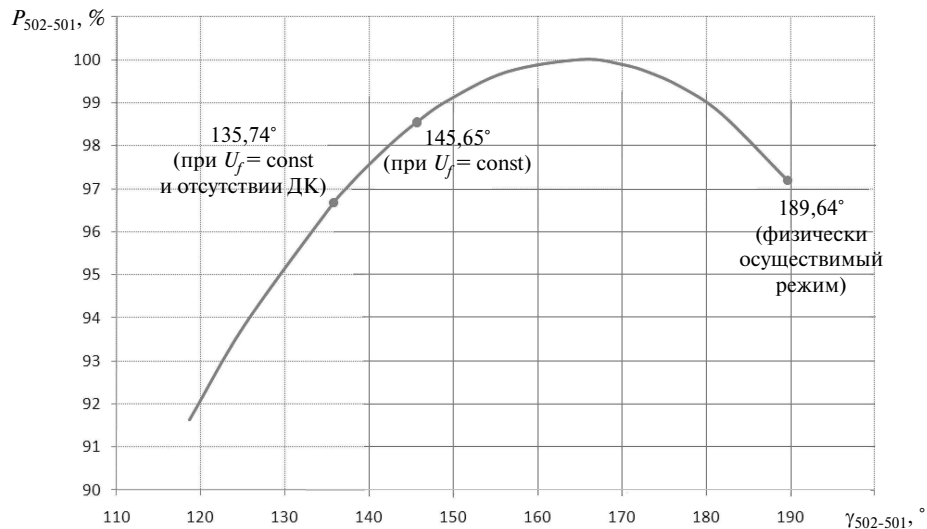


Рис. 3. Предельная передаваемая мощность в сечении 502–501 при упрощенном представлении пяти энергосистем

устойчивых (стабилизируемых) в колебательном отношении режимов объединенных энергосистем отвечает их позиционному представлению. При введении интенсивного управления со средневзве-

шенными (неоптимальными) настройками регуляторов возбуждения синхронных машин система оказывается стабилизируемой во всей области потенциально устойчивых режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жданов, П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем [Текст] / П.С. Жданов / Под ред. Л.А. Жукова. — М.: Энергия, 1979. — 455 с.
2. Методические указания по устойчивости энергосистем [Текст]. — 30.06.2003. — № 277.
3. **Рагозин, А.А.** Обобщенный анализ динамических свойств энергообъединений на основе структур-

ного подхода [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.А. Рагозин / СПбГТУ. — СПб., 1998. — 39 с.

4. **Попов, М.Г.** Развитие методов и программного обеспечения исследований динамических свойств электроэнергетических систем [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Г. Попов / СПбГТУ. — СПб., 2001. — 16 с.

REFERENCES

1. **Zhdanov, P.S.** Voprosy ustojchivosti elektricheskikh system [Tekst] / P.S. Zhdanov / Pod. red. L.A. Zhukova. — M.: Energiia, 1979. (rus.)
2. Metodicheskie ukazaniia po ustojchivosti energosistem [Tekst]. 30.06.2003. — № 277. (rus.)
3. **Ragozin, A.A.** Obobshchennyj analiz dinami-cheskikh svoystv energoob'edinenij na osnove strukturno-

go podkhoda [Tekst]: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk / A.A. Ragozin / SPbSTU. — SPb., 1998. (rus.)

4. **Popov, M.G.** Razvitie metodov i programmogo obespecheniia issledovanij dinamicheskikh svoystv elektroenergeticheskikh sistem: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk / M.G. Popov / SPbSTU. — SPb: 2001. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

ПОПОВ Максим Георгиевич — кандидат технических наук доцент заместитель заведующего кафедрой электрических станций и автоматизации энергосистем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

РОПОВ Maxim G. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

ЗАХАРОВА Елена Вячеславовна — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: z_e_zakh@mail.ru

ZAKHAROVA Elena V. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: z_e_zakh@mail.ru