

МЕТОДИКА ПОИСКА АДАПТИВНОЙ ТРАЕКТОРИИ УТЯЖЕЛЕНИЯ ДЛЯ СХЕМ ЭС ЦЕПОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ

В.А. Сухоруков

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

I. Введение

Определение допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (КС) энергосистем (ЭС) является одной из важных задач, решаемых системными операторами в России и за рубежом как на этапе краткосрочного планирования, так и при управлении электроэнергетическим режимом в реальном времени. Величина максимально допустимого (МДП) и аварийно допустимого (АДП) перетоков активной мощности зависит от различных факторов, например, от температуры окружающей среды, состава генерирующего оборудования на электростанциях, величины потребления и генерации активной мощности, перетоков активной мощности по смежным КС, объема управляющих воздействий (УВ) от устройств и комплексов противоаварийной автоматики. При расчете величин МДП и АДП с использованием расчетной модели (РМ) контрольных измерений технолог может рассмотреть только ограниченное число схемно-режимных и схемно-балансовых ситуаций. Кроме того, он вынужден учитывать наихудшую возможную схемно-режимную ситуацию, которая в реальном режиме работы ЭС может и не произойти.

При таком подходе неизбежно возникает проблема неполного использования существующей пропускной способности КС из-за ограниченного числа рассматриваемых схемных и режимных параметров и необходимости учета наихудших из них.

Решением проблемы является использование текущей РМ ЭС, получаемой после процедуры оценивания состояния (ОС) на основе данных телеметрии, поступающей в SCADA–систему диспетчерского центра. В этом случае реализуется циклический расчет величин МДП и АДП в режиме, близком к реальному времени. Рассчитанные значения допустимых перетоков будут обновляться в темпе процесса изменения режима ЭС.

В настоящее время получили развитие системы, осуществляющие мониторинг запасов устойчивости ЭС и расчет допустимых перетоков в режиме, близком к реальному времени [1 – 8]. Основной задачей таких систем является определение предельного

перетока по статической аperiodической устойчивости (САУ), по статической устойчивости по напряжению и по динамической устойчивости.

Примером такой системы является программно-аппаратный комплекс (ПАК) система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ). ПАК СМЗУ представляет собой совместный проект специалистов АО «НТЦ ЕЭС» и АО «СО ЕЭС», находящийся в промышленной эксплуатации в диспетчерских центрах. ПАК СМЗУ позволяет определять в циклическом режиме величины МДП и АДП в КС, используя для анализа и расчета предельных по САУ перетоков активной мощности вектор изменения режима (ВИР) [6, 7]. ВИР представляет собой аналог траектории утяжеления и задается как совокупность безразмерных коэффициентов по генерации K_G и по нагрузке K_H в узлах ЭС [8, 9].

Рассмотрев указанные работы, можно заключить, что в большинстве случаев для анализа САУ и расчета предельных по САУ перетоков используется пошаговое утяжеление режима с заранее задаваемой траекторией утяжеления или ее аналогов, таких как ВИР. Использование неизменной траектории утяжеления при изменяющейся РМ ЭС, формируемой после каждого цикла процедуры ОС, может приводить к ошибкам и погрешностям при определении предельного по САУ перетока активной мощности. Кроме того, использование неизменной траектории утяжеления или неизменных коэффициентов ВИР при изменении режима ЭС, может в некоторых режимах приводить к нарушению устойчивости в смежном КС, а не в исследуемом КС, что ведет к недоиспользованию пропускной способности исследуемого КС.

Поэтому можно сделать вывод о необходимости совместного изменения траектории утяжеления и РМ, то есть траектория утяжеления должна адаптироваться к изменению режимных параметров ЭС.

В настоящее время специалистами АО «НТЦ ЕЭС» ведется разработка технологии динамического ВИР, которая позволила бы изменять коэффициенты участия генераторов в ВИР при изменении электроэнергетического режима [10].

Целью настоящего исследования является создание методики поиска адаптивной траектории утяжеления для схем энергосистем цепочечной структуры и апробации методики на КС системообразующей сети 500 кВ.

II. Методика поиска адаптивной траектории утяжеления для схем ЭС цепочечной структуры

В качестве исходных данных приняты: исследуемое КС; перечень смежных КС по отношению к исследуемому; перечень генераторов электростанций по разные стороны от исследуемого КС, которые будут использованы в процессе утяжеления; аварийно допустимые напряжения (АДН) $U_{\text{АДН}}$ для узлов, соединяющих связи смежных КС; граничный уровень напряжения $U_{\text{гран.}}$ для узлов, соединяющих связи исследуемого КС; количество шагов утяжеления за один цикл алгоритма; величина приращения мощности за один шаг утяжеления.

Методика объясняется на примере схемы ЭС, представленной на рис. 1.

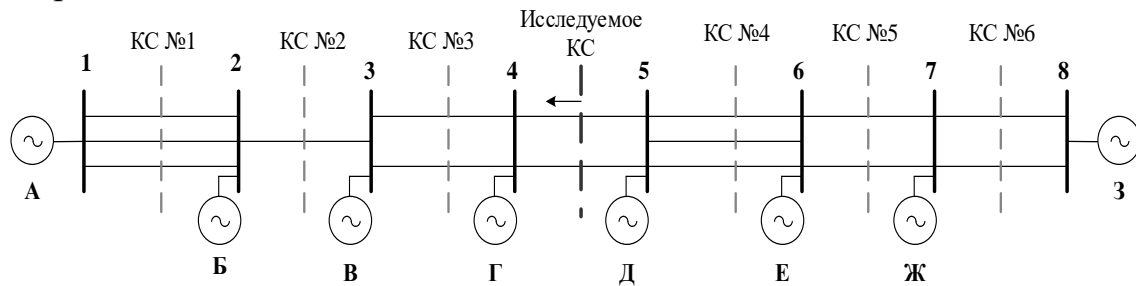


Рис. 1. Схема ЭС цепочечной структуры

Буквами А – З обозначены электростанции, используемые в процессе утяжеления; цифрами 1 – 8 обозначены узлы схемы. Жирной пунктирной линией отмечено исследуемое КС. Тонкими пунктирными линиями обозначены смежные КС по отношению к исследуемому.

Методика состоит из трех этапов.

На **первом этапе** происходит определение порядка загрузки генераторов электростанций по разные стороны от исследуемого КС. В качестве критерия порядка загрузки генераторов используется изменение значения определителя матрицы Якоби относительно исходного режима.

На **втором этапе** происходит определение приращений для каждого узла утяжеления. Если набирается пять шагов утяжеления по 60 МВт за шаг, то работа алгоритма по данному этапу прекращается.

На **третьем этапе** утяжеляют режим ЭС с контролем нарушения устойчивости в исследуемом КС. Выполняют пять шагов утяжеления по 60 МВт с приращениями, полученными на втором этапе, в узлах утяжеления, полученных на первом этапе.

Если в течение пяти шагов утяжеления происходит расхождение итерационного процесса метода Ньютона, то предельный режим по САУ достигнут, иначе производят анализ полученного режима.

В методике использованы АДН в контрольных пунктах (КП), которые соответствуют нормативному коэффициенту запаса САУ по активной мощности в КС в нормальной (ремонтной) схеме при расчете АДП, чтобы в процессе утяжеления режима проверять нарушение устойчивости в смежных КС.

Допустим, в процессе утяжеления режима и определения предельного перетока в исследуемом КС произошло снижение уровня напряжения в узлах 1 и 2 либо в узлах 7 и 8 ниже уровня (рис. 1), соответствующего $U_{\text{АДН}}$. В первом случае в качестве узлов утяжеления используют наиболее удаленные слева от исследуемого КС, но не левее КС №1, генераторы электростанций Б, В, Г. Во втором случае используют наиболее удаленные справа от исследуемого КС, но не правее КС №6, генераторы электростанций Д, Е, Ж.

На третьем этапе также контролируют нормированный угол по связям смежных КС и по связям исследуемого КС.

Например, выявлена тенденция увеличения нормированного угла по связям КС №2 либо КС №5 (см. рис. 1), и уровень напряжения в узлах, соединяющих связи КС №2 или КС №5, снизился ниже, чем $(U_{\text{АДН}} + \Delta U_{\text{запас}})$ кВ. В первом случае для дальнейшего утяжеления используются наиболее удаленные слева от исследуемого КС, но не левее КС №2, генераторы электростанций В, Г. Во втором случае используют наиболее удаленные справа от исследуемого КС, но не правее КС №5, генераторы электростанций Д, Е.

В результате третьего этапа происходит утяжеление режима ЭС с постепенным «продвижением» к исследуемому КС и использованию все более близких, по отношению к исследуемому КС, генераторов электростанций до момента расхождения итерационного процесса и достижения предела по САУ в исследуемом КС.

III. Апробация методики поиска адаптивной траектории утяжеления и обсуждение результатов

КС №5 является частью двухцепного транзита СШ 500 кВ ТЭС №12 – ПС 500 кВ №15 (рис. 2).

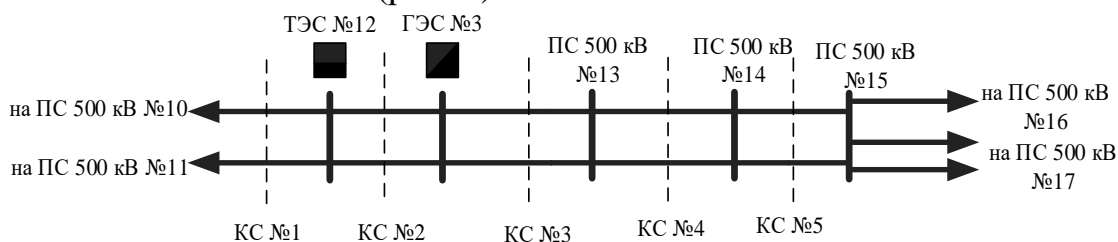


Рис. 2. Двухцепный транзит

Для КС №5 рассматривались две схемно-режимные ситуации (табл. 1). Расчеты проводились для перетока активной мощности в направлении «на запад».

Таблица 1. Схемно-режимные ситуации для КС №5

№ схемно-режимной ситуации	Переток в КС №5 в исходном режиме, МВт	Предельный переток по ВИР СМЗУ, МВт	Предельный переток при использовании методики, МВт	Схема КС №5
1	678	2612	2931	Ремонт ВЛ 500 кВ, входящей в смежное КС №1
2	317	2810	2864	Ремонт ВЛ 500 кВ, входящей в смежное КС №11

На рис. 3 приведены смежные КС для КС №5: КС №1 – №3, КС №6 – №11, а также электростанции, используемые в процессе утяжеления режима: на разгрузку ТЭС №1 – №12, ГЭС №1 – №3, на загрузку ТЭС №13, ГЭС №4 – №6. Также приведены значения перетоков активной мощности в предельном режиме в исследуемом и смежных КС, определенные по ВИР СМЗУ и по методике.

Цифрами обозначены ПС 500 кВ.

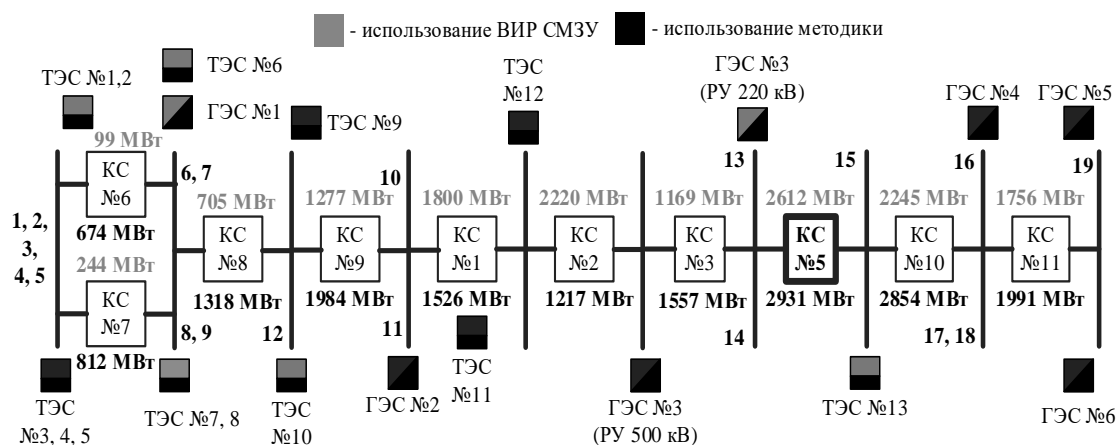


Рис. 3. Смежные КС и электростанции для КС №5, значения перетоков активной мощности в предельном режиме в исследуемом и смежных КС

В качестве примера рассмотрим схемно-режимную ситуацию №1 для КС №5.

Предельный переток, определенный по методике, на 319 МВт больше предельного перетока, определенного по ВИР СМЗУ. Разница между значениями предельных перетоков обусловлена меньшей загрузкой по активной мощности смежных КС №1, №2 при использовании методики. Предельный переток достигается при меньших значениях напряжения и больших значениях нормированных углов по связям. Этот факт говорит о том, что при использовании методики происходит загрузка исследуемого КС по активной мощности на большую величину, чем при использовании ВИР, происходит увеличение предельного по САУ перетока активной мощности в исследуемом КС.

Значения напряжений, соответствующие узлам, соединяющим связи исследуемого КС №5, снижаются ниже граничного напряжения в 450 кВ при использовании методики, а при использовании ВИР СМЗУ – не снижаются. Однако, граничный уровень напряжения $U_{\text{гран}}$ представляет собой информативный показатель, и в предельном режиме не обязательно уровни напряжений в узлах, соединяющих связи исследуемого КС, должны быть ниже его.

При использовании ВИР наименьшие уровни напряжений наблюдаются в узлах, соединяющих связи смежного КС №1, а наибольший нормированный угол наблюдается по связи, входящей в смежное КС №1, что говорит о том, что устойчивость нарушается не в исследуемом КС №5, а в смежном КС №1. При использовании методики наименьшие уровни напряжений наблюдаются в узлах, соединяющих связи исследуемого КС №5, а наибольшие нормированные углы наблюдаются по связям, входящим в исследуемое КС №5, что говорит о том, что устойчивость нарушается именно в исследуемом КС №5.

В таблице 2 приведены наименьшие напряжения в узлах 500 кВ по концам связей исследуемого и смежных КС.

Таблица 2. Наименьшие напряжения в узлах 500 кВ по концам связей исследуемого и смежных КС

Название узла	Значение напряжения, кВ по ВИР СМЗУ	Значение напряжения, кВ по методике
ПС 500 кВ №15	478,31	445,24
ПС 500 кВ №17	487,80	453,56
ПС 500 кВ №14	470,42	454,47
ПС 500 кВ №13	470,52	454,87
ТЭС №12	450,20	472,09
ПС 500 кВ №10	468,36	486,50

В таблице 3 приведены наибольшие нормированные углы по связям исследуемого и смежных КС.

Таблица 3. Наибольшие нормированные углы по связям исследуемого и смежных КС

Название связи	Δ_{ij}/X_{ij} , о.е.
Использование ВИР СМЗУ	
ВЛ 500 кВ смежного КС №1	0,571995
ВЛ 500 кВ №1 исследуемого КС №5	0,332974
ВЛ 500 кВ №2 исследуемого КС №5	0,331308
ВЛ 500 кВ №1 смежного КС №2	0,295445
ВЛ 500 кВ №2 смежного КС №2	0,293652
ВЛ 500 кВ смежного КС №11	0,218326
Использование методики	
ВЛ 500 кВ №1 исследуемого КС №5	0,421047
ВЛ 500 кВ №2 исследуемого КС №5	0,418933
ВЛ 500 кВ смежного КС №1	0,417093
ВЛ 500 кВ №1 смежного КС №10	0,307942
ВЛ 500 кВ №2 смежного КС №10	0,307335
ВЛ 500 кВ смежного КС №11	0,275505

IV. Заключение

На основании результатов, полученных при апробации методики поиска адаптивной траектории утяжеления, можно сделать вывод о ее корректности применительно к схеме ЭС цепочечной структуры. Методика позволяет в некоторых схемно-режимных ситуациях увеличить расчетный предельный переток по САУ в исследуемом КС и максимально использовать пропускную способность исследуемого КС за счет меньшей загрузки по активной мощности смежных КС и достижения предела по САУ именно в исследуемом КС. Методика также была апробирована на КС №1 двухцепного транзита 500 кВ для различных схемно-режимных ситуаций, для которых расчетный предельный переток по САУ при использовании методики получался меньше, чем предельный переток по ВИР СМЗУ за счет большей загрузки по активной мощности смежных КС. Кроме того, была выявлена одна схемно-режимная ситуация, в которой значения предельных перетоков, определенных по методике и по ВИР СМЗУ, практически совпадают между собой.

Дальнейшая алгоритмизация методики позволит выполнить ее апробацию на большем числе КС схем цепочечной структуры и рассмотреть большее число схемно-режимных ситуаций для накопления статистических данных. При удовлетворении требований

к быстродействию методики в режиме, близком к реальному времени, ее можно будет адаптировать для ПАК СМЗУ.

Рассмотренная методика поиска адаптивной траектории утяжеления применима только к схемам ЭС цепочечной структуры. Поскольку в реальных ЭС встречаются и другие типы структурных схем ЭС, то в дальнейших исследованиях планируется доработка методики поиска адаптивной траектории утяжеления для других структурных схем ЭС, например, кольцевых, сложнзамкнутых.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Maslennikov, E. Litvinov, M. Vaiman, M. Vaiman. Implementation of ROSE for on-line voltage stability analysis at ISO New England. In: *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*. 27–31 July 2014, National Harbor. New Jersey: IEEE; 2014, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939549>
2. S. Malik, M. Vaiman, M. Vaiman. Implementation of ROSE for real-time voltage stability analysis at WECC RC. In: *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*. 14–17 April 2014, Chicago. New Jersey: IEEE; 2014, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TDC.2014.6863542>
3. J. C. Cepeda, G. A. Argüello, P. X. Verdugo, A. B. De La Torre. Real-time monitoring of steady-state and oscillatory stability phenomena in the Ecuadorian power system. In: *2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA)*. 10–13 September 2014, Medellin. New Jersey: IEEE; 2014, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2014.6955219>
4. Jian Chen, T. Mortensen, B. Blevins, C. Thompson, Pengwei Du. ERCOT experience in using online stability analysis in real-time operations. In: *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 26–30 July 2015, Denver. New Jersey: IEEE; 2015, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285707>
5. J. Zhao, W. Huang, Z. Fang, F. Chen, K. Li, Y. Deng. On-Line Voltage Stability Monitoring and Control (VSMC) System in Fujian power grid. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 24–28 June 2007, Tampa. New Jersey: IEEE; 2007, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385975>
6. Александров А.С., Максименко Д.М., Михайленко А.Ф., Неуймин В.Г. Развитие системы мониторинга запасов устойчивости с контролем динамической устойчивости для учета действия противоаварийной автоматики // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2017. №1 (76). С. 64–72.

7. Томалев А.А. Система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ). Опыт эксплуатации и перспективные направления развития СМЗУ в ОЭС Сибири // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. научн. тр. юбилейной X Междунар. научн.-техн. конф. (г. Иркутск, 16–20 сентября 2019 г.). Иркутск, 2019. Т. 2. С. 83–86.
8. Александров А.С., Максименко Д.М., Неуймин В.Г. Расчет максимально допустимых перетоков в системе мониторинга запасов устойчивости // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. №1 (70). С. 13–23.
9. Жуков А.В., Сацук Е.И. Средство от опасных перетоков. // Корпоративный бюллетень АО «СО ЕЭС» 50 Гц. 2017. №3(27). С. 1–3.
10. Александров А.С., Михайленко А.Ф., Неуймин В.Г., Сацук Е.И. Использование технологии динамического ВИР для определения предельных режимов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. №2 (81). С. 70–76.

Научный руководитель: Н.Л. Бацева, к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ.