

Б.Т. Кадхем, А.Н. Беляев, С.В. Смоловик

ПОДАВЛЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДА В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕ С ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Один из способов повышения пропускной способности линий электропередачи, известный с конца 40-х годов, — применение продольной емкостной компенсации. Последовательная компенсация уменьшает общее индуктивное сопротивление линии электропередачи и таким образом делает линию электрически “короче” [1–3].

Важной особенностью последовательно включенных конденсаторных батарей как части системы электропередачи является их высокая надежность и наличие собственных устройств защиты. Надежность устройств продольной компенсации (УПК) находится на уровне таких элементов, как линии, выключатели, трансформаторы и т. д. Система защиты УПК обеспечивает, с одной стороны, быстрое и эффективное шунтирование конденсаторов в условиях, когда внешние возмущения могли бы вызвать повреждение конденсаторного оборудования, а с другой — повторное включение УПК в систему с минимальным запаздыванием после ликвидации повреждения в примыкающей сети.

Выбор местоположения УПК и степени компенсации производится на основе оценки экономичности и надежности работы энергосистемы. Степень компенсации обычно находится между 25 и 70 % по отношению к индуктивному сопротивлению линии. Диапазон установленных мощностей УПК варьируется в пределах от 100 до 1000 МВА.

Вал турбоагрегата представляет собой сложную колебательную систему с большим количеством степеней свободы, в которой возможно развитие и длительное существование опасных для конструкции турбоагрегата многочастотных процессов. Характер этих процессов зависит от электромагнитных моментов генератора и возбудителя, в свою очередь определяемых работой АРВ и связью генератора с ЭЭС. В силу этого демпферные свойства турбоагрегата должны исследоваться на основе комплексной модели, включающей математические описания валопровода, генератора

(с учетом условий его присоединения к ЭЭС), возбудителя и АРВ [4].

В качестве основного объекта исследования принята простейшая расчетная схема электропередачи с УПК, представленная на рис. 1. Для упрощения исследований и однозначной трактовки получаемых результатов предполагалось, что параметры всех индуктивных элементов электропередачи постоянны. Исследования резонансных процессов в компенсированной электропередаче проводились в основном для турбогенератора ТВВ-200.

Субсинхронный резонанс представляет собой состояние электроэнергетической системы, при котором происходит обмен энергиями между электрической сетью и валопроводом генератора на одной или нескольких частотах, лежащих ниже синхронной. Вероятность такого взаимодействия существенно возрастает при использовании установок продольной емкостной компенсации. Благодаря наличию емкости собственная (резонансная) частота электрической системы (см. рис. 1) становится меньше

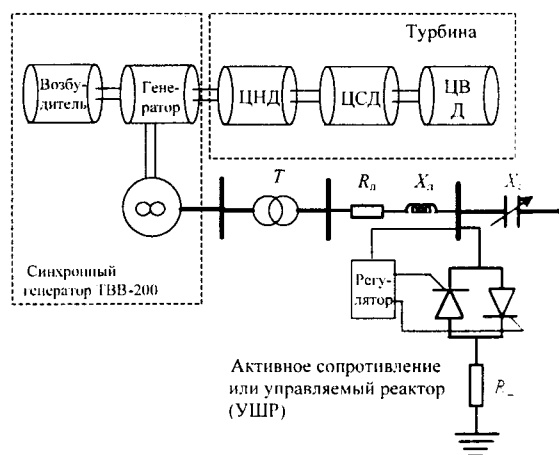


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи с продольной емкостной компенсацией

синхронной и в простейшем случае генератора, работающего параллельно с системой бесконечной мощности, составляет



$$\omega_n = \omega_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_d'' + X_T + X_L}}, \quad (1)$$

где ω_0 — синхронная частота вращения; X_C — реактивное сопротивление емкости; X_d'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора; X_T , X_L — индуктивные сопротивления трансформатора и линии электропередачи на синхронной частоте.

Наложение крутильных колебаний с частотой ω_n на вращение ротора с частотой ω_0 порождает составляющие статорного напряжения подсинхронной частоты

$$\omega_{\text{под}} = \omega_0 - \omega_n, \quad (2)$$

а также надсинхронной частоты

$$\omega_{\text{над}} = \omega_0 + \omega_n. \quad (3)$$

Когда подсинхронная частота приближается к собственной (резонансной) частоте электрической системы, компонента тока статора на этой частоте образует составляющую электромагнитного момента, которая поддерживает колебания вала.

Обычно эти колебания достаточно быстро возрастают и представляют собой серьезную опасность для валопровода. Тем не менее значительные экономические выгоды от использования УПК заставляют идти не по пути отказа от применения, а по пути разработки мероприятий, предотвращающих субсинхронный резонанс. В ряде случаев внедряют системы релейной защиты (хотя их, скорее, можно отнести к информационно-вычислительным системам), которые отключают генераторы от сети при появлении признаков резонансного процесса.

Появление продольно включенной емкости существенно изменяет демпферные свойства электропередачи. Для выявления возможности электромеханического резонансного взаимодействия нами были выполнены расчеты характеристических чисел системы уравнений, описывающих электропередачу, при изменении величины емкостного сопротивления УПК X_C по отношению к суммарному индуктивному сопротивлению электропередачи $X_L = X_d'' + X_T + X_L = 0,85 = 1,7 X_L$ (табл. 1).

В табл. 2 приведены собственные значения (характеристические числа) для электропередачи с турбогенератором ТВВ-200 и при $X_C = 0,6 X_L$. Эти числа могут быть разделены на группы и пронумерованы для удобства: характеризующие валопровод (номера 1–8), сеть

Таблица 1

Теоретический расчет собственных частот электрической системы

X_C	$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{X_C}{1,7 \cdot X_L}}$	$\omega_0 - \omega$	$\omega_0 + \omega$
$0,25 X_L$	120,47	193,68	343,63
$0,32 X_L$	136,3	177,85	450,46
$0,60 X_L$	186,63	127,52	500,79

Таблица 2

Собственные значения матрицы, описывающей маловозмущенные переходные процессы в электропередаче

Номера характеристических чисел	Вещественная часть	Мнимая часть
1, 2	-0,14582	407,27
3, 4	-0,039118	191,15
5, 6	-0,023694	174,19
7, 8	+1,8462	125,79
9, 10	-29,393	42,03
11, 12	-7,7068	127,54
13, 14	-6,4786	500,36
15, 16	-0,71174	9,3468
17	-2,4456	0,0
18	-1,1006	0,0
19	-0,86591	0,0
20	-0,31861	0,0
21	-38,464	0,0
22	-25,686	0,0
23	-14,344	0,0
24	-11,149	0,0

(13, 14), АРВ и обмотки возбуждения генератора и возбудителя (9, 10, 17–24). Собственные значения (15, 16) связаны с движением ротора генератора относительно приемной системы.

Как известно, вещественные части таких чисел позволяют судить о скорости затухания отдельных составляющих свободного процесса, а мнимые части — об их частотах.

Кривые изменения подсинхронной и надсинхронной частот электромагнитных колебаний в зависимости от уровня емкостной компенсации представлены на рис. 2. Они показывают, что при определенных условиях собственная подсинхронная частота электрической сети будет совпадать с частотой колебаний валопровода (в рассматриваемом примере это частоты 191, 174 и 125 рад/с).

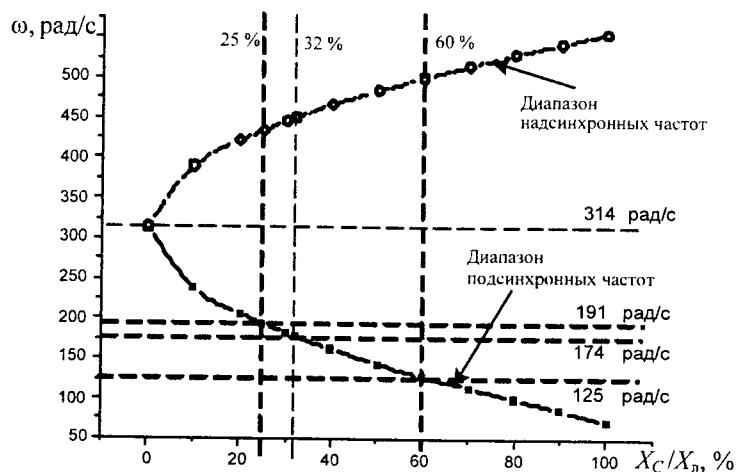


Рис. 2. Влияние степени продольной емкостной компенсации на частоты электромагнитного резонанса (—□—) и условия электромеханического резонанса ((—)) — собственные частоты валопровода

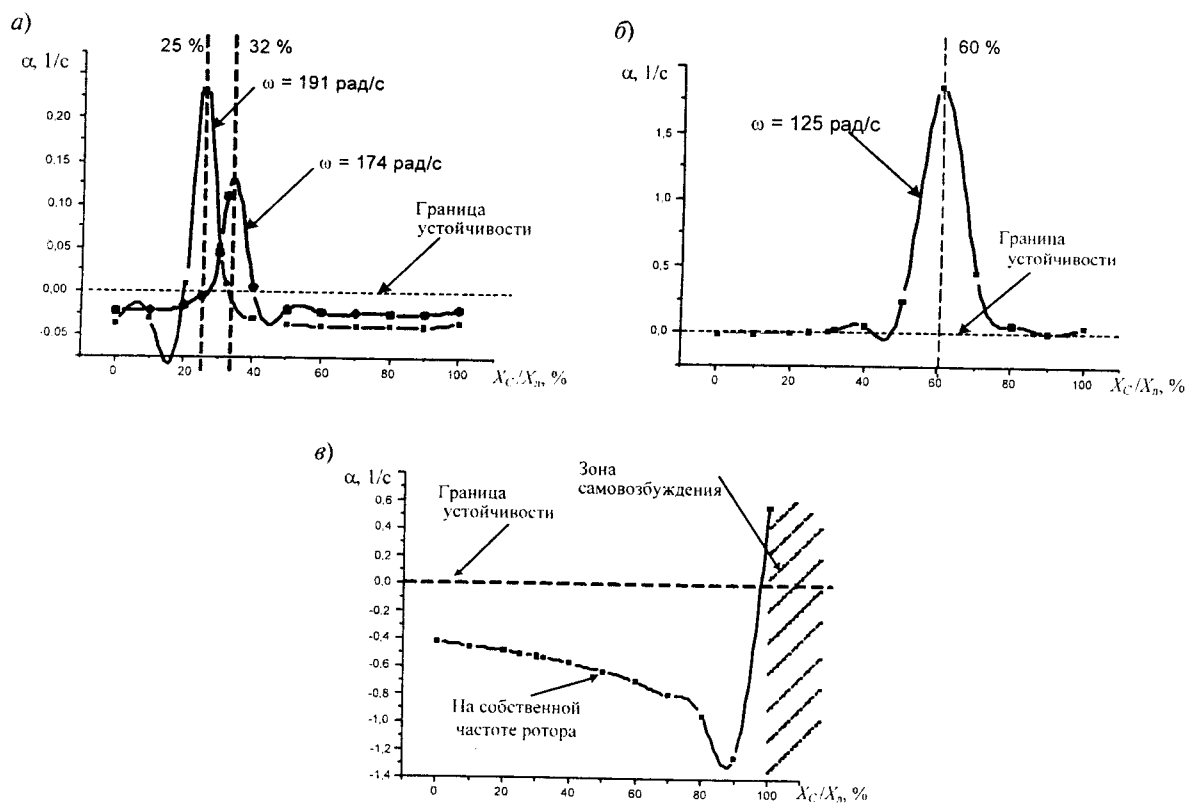


Рис. 3. Влияние степени продольной компенсации на показатели затухания колебаний валопровода с собственными частотами: а — 191 и 174 рад/с; б — 125 рад/с; в — с частотой ротора 9,35 рад/с



При совпадении какой-либо из собственных частот электромагнитных колебаний в электрической системе с одной из собственных частот валопровода возникают условия электро-механического резонанса, представляющие опасность для турбоагрегата. На рис. 3, а, б представлены кривые, которые иллюстрируют изменение вещественных частей характеристических чисел, соответствующих колебаниям валопровода соответственно на частотах 191, 174 и 125 рад/с. Взаимодействие валопровода с УПК на частоте 407 рад/с невозможно, ибо такая частота не соответствует величинам X_C .

Изменение степени устойчивости колебаний ротора на собственной частоте относительно приемной системы в зависимости от степени компенсации электропередачи иллюстрирует рис. 3, в. Видно, что зона асинхронного самовозбуждения (неустойчивость данной составляющей движения) достигается при значениях $X_C \gg X_n$, т. е. значительно превышающих индуктивное сопротивление линии электропередачи.

При величинах X_C в диапазоне $0,1-0,6X_n$, т. е. $X_C = 0,05-0,3$ о. е. (что весьма вероятно с точки зрения технически приемлемых величин степени компенсации), имеет место увеличение положительной вещественной части характеристического числа, соответствующего частоте $\omega = 191$ рад/с. При $X_C = 0,25X_n$ она равна $\alpha = +0,23213$, что требует выполнения исследований по определению характеристик процессов в такой электропередаче. Наиболее опасными являются значения $X_C = 0,32X_n$, когда $\alpha = +0,10989$ 1/с, $\omega = 174$ рад/с, а также $X_C = 0,6X_n$, когда $\alpha = +1,8462$ 1/с, $\omega = 125$ рад/с. Указанные величины X_C могут превышать технически реальные, однако, как отмечалось выше, необходимость оценки характеристик процессов может возникнуть и при таких сопротивлениях в силу возможных изменений конфигурации электрической сети, внешней по отношению к эквивалентной электростанции.

В течение последнего десятилетия были разработаны и созданы конструкции управляемых аппаратов, использующих эффект насыщения ферромагнитного сердечника для изменения в достаточно широких пределах входного индуктивного сопротивления. Они предназначались главным образом для управления режимом напряжений в дальних электропередачах. Весьма вероятно применение уп-

равляемых шунтирующих реакторов (УШР) и вблизи установок продольной емкостной компенсации, поскольку в этих условиях требуется сравнительно быстрая коррекция режима реактивной мощности. Кроме того, динамические свойства УШР позволяют использовать его и в качестве средства подавления субсинхронного резонанса. Предложения по установке УШР вблизи электростанции, передающей энергию через компенсированную электропередачу, описаны в [4].

В качестве управляющих параметров ранее использовались скольжение ротора турбогенератора, измеряемое специальным устройством, и его производная. Нами были рассмотрены установка УШР в непосредственной близости от УПК и применение для управления реактором сигналов типа отклонения напряжения в узле его подключения и производной напряжения [5], а также аналогичных сигналов для тока линии (рис. 4).

Демпферные свойства электропередачи с управляемым шунтирующим реактором и активным сопротивлением иллюстрирует рис. 5. Из него следует, что применение УШР обеспечивает демпфирование колебаний на частоте 125 рад/с с приемлемым показателем затухания. Кроме того, регулирование УШР обеспечивает и хорошее затухание электро-механических колебаний ротора генератора.

Проверка эффективности принятого закона управления иллюстрируется графиками на рис. 6 и 7, соответствующими работе УПК и УШР после возмущения режима в схеме электропередачи с резонансными параметрами. Достаточно быстрое изменение проводимостей продольной емкости и реактора приводит к эффективному демпфированию электрических и механических переходных процессов рассматриваемой электропередачи.

Таким образом, в ходе работы проанализированы переходные процессы в электропередаче с УПК. При реальных степенях компенсации возможно возникновение резонансных явлений на частотах, включающих низшие собственные частоты колебаний валопровода. Субсинхронный резонанс проявляется в быстром нарастании скручивающих моментов и достижении их опасных величин за время $t = 0,8-1$ с.

В качестве мероприятий по противодействию субсинхронному резонансу рассмотрено

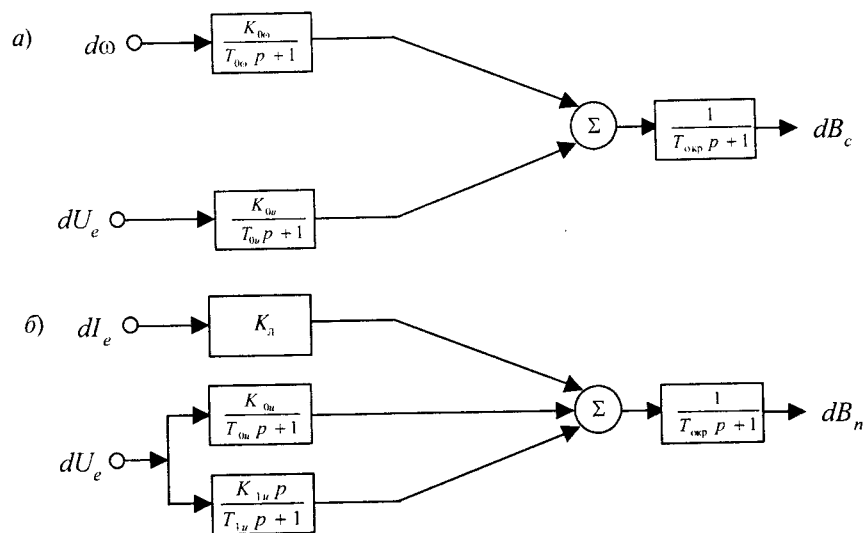


Рис. 4. Блок-схема систем управления продольной емкостью (а) и УШР (б)

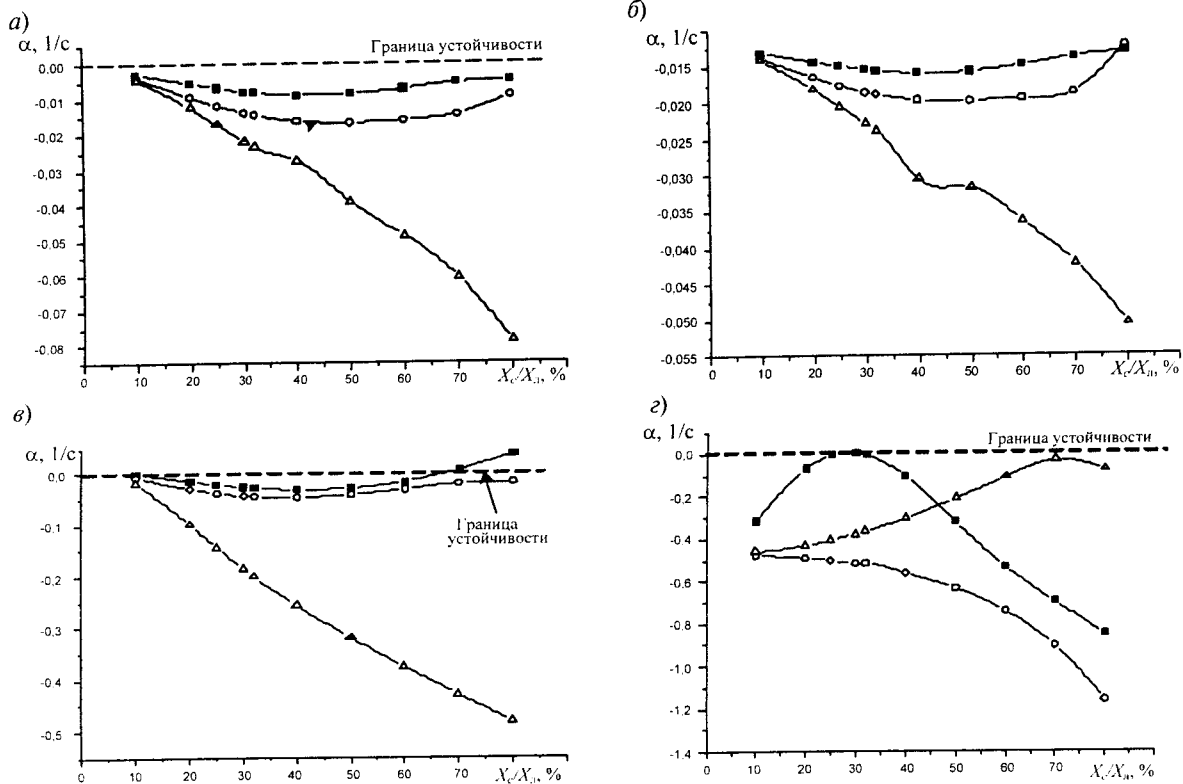


Рис. 5. Зависимости показателей затухания колебаний на резонансных частотах валопровода 191 (а), 174 (б), 125 (в), рад/с, и ротора (г) от уровня продольной емкостной компенсации при разных способах демпфирования: с помощью активного сопротивления (—■—), УШР (—□—) и УШР+УПК (—△—)

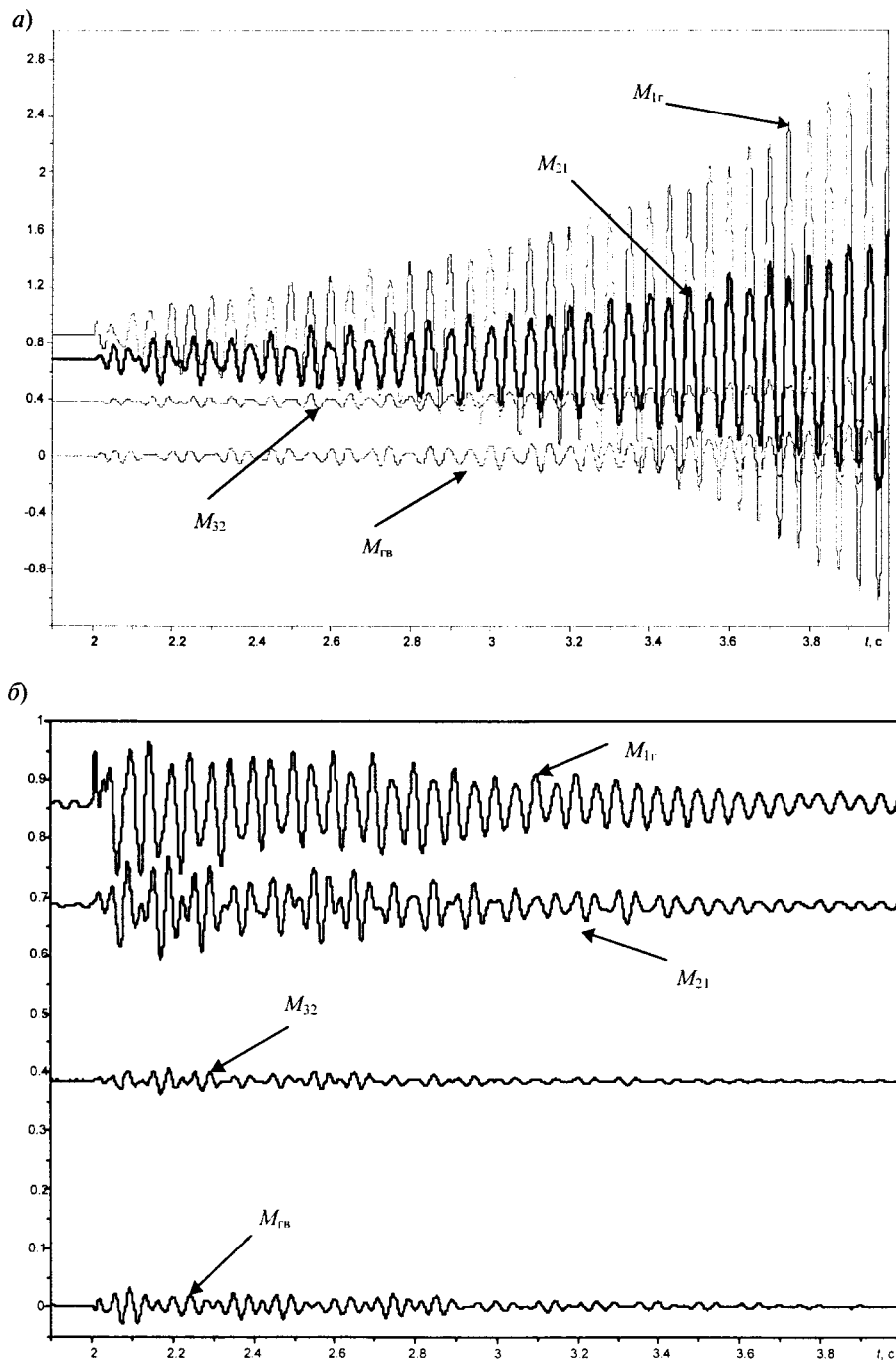


Рис. 6. Изменение скручивающих моментов после возмущения в системе ($X_c/X_n = 60\%$) при отсутствии управляемого реактора (а) и с использованием УШР (б)

Скручивающие моменты: между генератором и ЦНД (M_{1r}), между генератором и возбудителем ($M_{rв}$), между ЦНД и ЦСД (M_{12}), между ЦСД и ЦВД (M_{32})

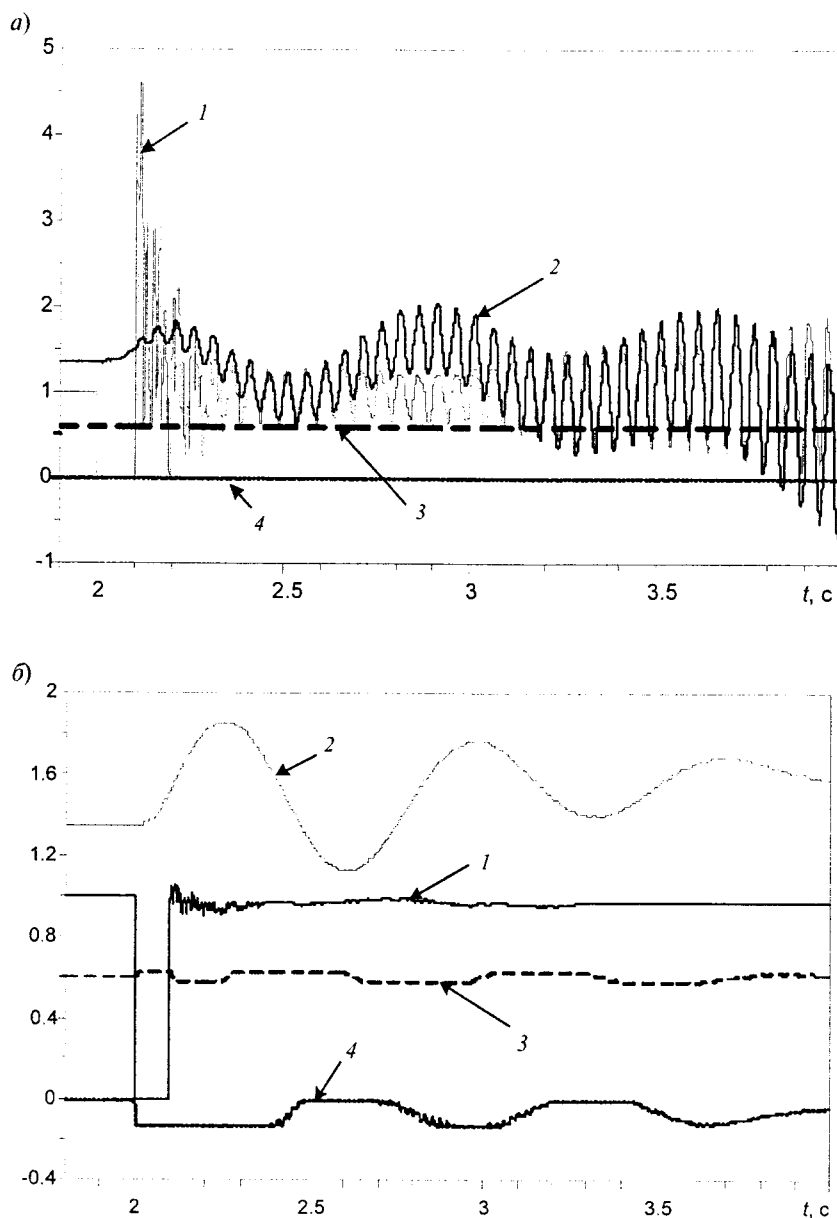


Рис. 7. Переходный процесс, вызванный коротким замыканием длительностью 0,1 с на шинах УПК при отсутствии управления уровнями продольной и поперечной компенсации (а) и при использовании УШР+УПК (б):

1 – напряжение на зажимах генератора; 2 – угол генератора; 3 – уровень компенсации; 4 – изменение проводимости УШР на шинах УПК

применение активных сопротивлений, включаемых вблизи зажимов УПК с помощью тиристорного коммутатора на фазное или междофазное напряжение, и управляемого шунтирующего реактора. Для управления указанными устройствами используются сигналы отклонения тока линии электропередачи, напряжения на зажимах емкости и их производные. Наи-

большей эффективностью из рассмотренных мероприятий обладает управляемый реактор, обеспечивающий достаточное демпфирование на частотах крутильных колебаний. Эффективность указанных мероприятий проверена также путем расчета динамических процессов по программам, базирующимся на численном интегрировании уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luis A.S., Bianco A., Willis F.L., AbdelAty. Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations // IEEE Trans. on Power delivery 2003. Vol. 18, № 1. P. 243–252.
2. Radday K.R., Prabhu N. Analysis of SSR with three-level twelve-pulse VSC-based interline power-flow controller // IEEE Trans. on Power delivery. 2007. Vol. 22, № 3. P. 1688–252.
3. Imani M.R., Edris A. Eigenanalysis of series compensation schemes reducing the potential of
4. Абу-Латта Н.З., Окопов Р.В., Смолюк С.В. System. 1995. Vol. 10, № 2. P. 876–883.
5. Беляев А.Н., Смолюк С.В. Программирование на примере электротехнических и электротехнических задач. СПб.: Нестор, 2006.
6. Абу-Латта Н.З., Окопов Р.В., Смолюк С.В. Расчет переходных процессов генераторов при несимметричных и последовательных коротких замыканиях // Изв. вузов. Энергетика. 1990. № 11. С. 47–50.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВАРИСТОРНОЙ КЕРАМИКИ НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОММУТАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

В.В. Тумкоб, Д.В. Чуров

Варисторы широко применяются в электротехнике, в частности на их основе строятся ограничители перенапряжений (ОПН) — устройства, предназначенные для защиты оборудования, предназначенные от импульсов перенапряжения. При выборе уровня изоляции элементов энергосистемы делают ставку на стабильность параметров ОПН. Поэтому очень важно, чтобы применяемая в них варисторная керамика не меняла свои свойства под воздействием как постоянно протекающего через эти устройства малого тока в нормальном режиме работы, так и коротких импульсов тока большой амплитуды, сопровождающих режим отключения перенапряжений.

Варистор — двухполюсный нелинейный резистор, сопротивление которого управляется напряжением. Основной его характеристикой является коэффициент нелинейности вольт-амперной характеристики β , от которого зависит организуемая способность ОПН. Коэффициент нелинейности однозначно характеризует нелинейные свойства, если ВАХ имеет степенной вид:

$$I = BU^\beta, \quad U = AI^{-1/\beta}, \quad \beta = \alpha^{-1}, \quad B = A^{-\beta}.$$

где I, U — мгновенные значения тока и напряжения; коэффициенты A, B, α, β — связаны соотношениями

$$(1) \quad I = BU^\beta, \quad U = AI^{-1/\beta}, \quad \beta = \alpha^{-1}, \quad B = A^{-\beta}.$$

$$\beta = \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right) / \lg \left(\frac{I_1}{I_2} \right).$$

На практике приходится оговаривать, к какому значению отношения I_2/I_1 относится данное значение β . Если для простоты выбрать $I_2/I_1 = 10$, то

$$\beta = \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right) / \lg \left(\frac{I_1}{I_2} \right).$$

В большинстве случаев аппроксимация ВАХ степенным выражением является при близительной и коэффициент β зависит как от напряжения, так и от ширины интервала ΔU , для которого он определяется. Для расчета β достаточно измерить две точки ВАХ:

В целях упрощения в спецификациях технических документов для варисторов чаще приводят коэффициент напряжения, равный отношению U_2/U_1 при условии, что соответствующие токи связаны соотношением $I_2 = 10I_1$. Тогда U_1 представляет собой классификационное напряжение варистора при заданном классификационном токе I_1 .