

Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ НА УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ С УЧЁТОМ МОЩНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Под регулирующим эффектом нагрузки понимают изменение активной и реактивной мощностей электрической нагрузки вследствие изменения параметров энергосистемы, напряжения и частоты сети, препятствующее данному возмущению. При проведении практических расчетов регулирующим эффектом нагрузки часто пренебрегают. При значительной удаленности нагрузки от энергосистемы и электрически разветвленной сети статические характеристики нагрузки могут оказывать существенное влияние на параметры режима. В данной статье предлагается оценить влияние регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения сети с учётом значения мощности короткого замыкания. При исследовании смоделирована электрическая сеть исследуемого промышленного объекта в специализированном программном комплексе «КАТРАН» и определен регулирующий эффект рассматриваемой нагрузки. Составлен алгоритм определения влияния величины мощности короткого замыкания энергосистемы на напряжение на шинах питающей подстанции. Определены показатели статической устойчивости электроприёмников с учетом регулирующего эффекта нагрузки. В работе показано, что увеличение сопротивления связи с энергосистемой снижает ток мощность короткого замыкания энергосистемы, что приводит к большему влиянию регулирующего эффекта нагрузки на уровень питающего напряжения. В случае электрически удаленных от источников питания разветвленных сетей это приводит к необходимости подробного учета регулирующего эффекта нагрузки. Также увеличение удаленности электрической нагрузки от энергосистемы влияет на показатели устойчивости электрических машин. В работе подсчитан регулирующий эффект в различных узлах нагрузки объекта, исследовано влияние частотного регулирования основных электроприводов насосной станции на регулирующий эффект нагрузки и определено влияние регулирующего эффекта нагрузки на уровень питающего напряжения.

**Ключевые слова:** регулирующий эффект нагрузки, напряжение, мощность короткого замыкания, ток короткого замыкания, энергосистема, кабель, сопротивление, сеть, нагрузка, статическая устойчивость, электроприёмник.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность настоящей работы связана с повышением требований к качеству электроэнергии. При большой удаленности электрической нагрузки в промышленности от питающей сети регулирующий эффект мощных электроприёмников, таких как синхронные двигатели, может оказывать большое влияние на уровень напряжения сети. Поэтому оценка подобной зависимости является важной задачей в электроэнергетике на данный момент. Использование источников распределенной генерации также не исключает автономной работы нагрузки с энергосистемой. В этом режиме учет регулирующего эффекта нагрузки также становится актуальным.

Влияние потребляемой активной и реактивной мощностей в энергосистеме на уровень напряжения сети выражается регулирующим эффектом нагрузки по напряжению. Под регулирующим эффектом нагрузки подразумевается изменение активной и реактивной мощностей электрической нагрузки вследствие изменения параметров энергосистемы, напряжения и частоты сети, препятствующее данному возмущению. Степень этого влияния может быть разной, в зависимости от величины самой нагрузки и сопротивления электрической связи между нагрузкой и энергосистемой. Регулирующий эффект нагрузки численно выражается коэффициентами, которые представляют собой частные производные первого порядка. Величина, обратно пропорциональная коэффициенту регулирующего эффекта нагрузки, называется коэффициентом статизма нагрузки. На практике коэффициенты регулирующего эффекта нагрузки могут считаться по упрощенной ме-

тодике как отношение разности мощностей на каком-либо промежутке статической характеристики нагрузки к разности напряжения или частоты сети на этом же промежутке.

Вопросы построения статических характеристик нагрузки и расчёт установившегося режима синхронных машин были рассмотрены в статье [1]. То же, но для асинхронных машин, рассмотрено в статье [2]. Разработке математической модели электроприёмников посвящена статья [3]. Статические характеристики нагрузок промышленных потребителей рассмотрены в статьях [4-8]. Регулирующий эффект нагрузки рассмотрен в статьях [7, 8, 10, 11]. К зарубежным работам по этой и смежным темам относятся труды [14-17]. Анализ работ показал, что большая часть трудов посвящена вопросам исследования регулирующего эффекта таких электроприёмников, как синхронные и асинхронные двигатели [18-20]. В меньшей степени охвачены вопросы регулирующего эффекта специфических промышленных потребителей, например, таких как двигатели, получающих питание от частотных преобразователей. Такое исследование является необходимым в силу повсеместного перехода от прямого подключения в сеть приводов переменного тока к питанию через частотные преобразователи, а также пуск от них.

Кроме того, в имеющейся литературе недостаточно проработаны вопросы влияния параметров распределительной сети, таких как трансформаторы, воздушные и кабельные линии, на величину регулирующего эффекта. Особенно это важно при определении регулирующего эффекта комплексной нагрузки, поскольку распределительная сеть оказывает влияние на величину подводящего напряжения к каждому из электроприёмников.

То есть напряжение на источнике питания изменяется в заданной пропорции, тогда как напряжение, подводимое при этом к каждому из электроприемников распределенной сети может изменяться отличным образом в соответствии с характеристиками распределительной сети. Если данная сеть очень распределенная (в крупных сетях сети 10 кВ могут достигать десятки километров), то еще наложится регулирующий эффект естественной емкости кабельных линий.

Основной задачей настоящей работы является исследование зависимости напряжения сети от трёх параметров энергосистемы: мощности к.з., регулирующего эффекта нагрузки и величины самой нагрузки.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

В качестве исследуемого промышленного объекта научной работы была выбрана насосная станция цеха водоснабжения, где главными электроприёмниками являются двигатели напряжением по 10 кВ различных типов. Это шесть синхронных двигателей марки СДВ-1600, три синхронных двигателя СДН-1250 и два асинхронных двигателя АОД-630. Потребляемая ими мощность составляет 97% от суммарной расчётной активной мощности нагрузки. Кроме того, имеется низковольтная нагрузка, преимущественно состоящая из асинхронных двигателей с вентиляторным моментом сопротивления на валу. Суммарная установленная мощность объекта составляет 14,6 МВт. Питание станции идёт от трёх секций по 10 кВ, нагрузка по которым распределена примерно поровну.

В специализированном программном комплексе «КАТРАН» [21, 22] электрическая сеть данной станции была смоделирована и был определен её регулирующий эффект на примере 1 секции 10 кВ. В указанном программном комплексе используются метод последовательного эквивалентирования параметров режима для расчета установившихся режимов электрических сетей и метод последовательного утяжеления для определения статической устойчивости генераторов. Метод последовательного утяжеления режима состоит в последовательном изменении параметров исследуемой сети с заданным шагом. На каждом новом шаге считается установившийся режим, пока не будет обеспечена возможность расчёта. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчёт установившихся режимов энергосистем рассмотрены в статье [11].

Согласно расчетам, произведенным в «КАТРАН», суммарная активная расчётная нагрузка станции составляет 10,84 МВт в нормальном режиме работы.

С помощью данного программного комплекса были определены регулирующий коэффициент нагрузки и коэффициент статизма 1 секции 10 кВ с учётом и без учёта питающего кабеля, чтобы оценить влияние последнего на регулирующий эффект нагрузки. Результаты расчетов сведены в **табл. 1**. Очевидно, что учет протяженного кабеля существенно изменяет регулирующий эффект нагрузки.

Такие же расчеты были проведены для 1 секции 0,4 кВ с учётом и без учёта питающего силового трансформатора. Результаты расчетов сведены в **табл. 2**. Учет трансформатора оказывает меньшее влияние на параметры режима.

Таблица 1  
Коэффициенты 1 секции 10 кВ с учётом и без учёта кабеля

Параметры расчёта	1 секция 10 кВ без кабеля	1 секция 10 кВ с кабелем
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	3
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,25	1
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,01	0
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	10	10
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	0,33
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,8	1
$\Delta U_*/\Delta P_*$	100	$\infty$
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,1	0,1

Таблица 2  
Коэффициенты 1 секции 0,4 кВ с учётом и без учёта трансформатора

Параметры расчёта	1 секция 0,4 кВ без трансформатора	1 секция 10 кВ с трансформатором
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	3
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,75	2
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,015	0,015
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	2,5	2
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	0,33
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,57	0,5
$\Delta U_*/\Delta P_*$	66,66	66,66
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,4	0,5

Таким образом, наличие питающего кабеля и силового трансформатора ведёт к изменению коэффициентов регуливающего эффекта нагрузки. Они, в общем случае, снижаются. Поэтому при определении статических характеристик нагрузки необходимо учитывать характер распределительной сети.

Как отмечалось выше, одной из современных тенденций электроэнергетики является переход к использованию частотных преобразователей. С целью влияния этих изменений на регулирующий эффект нагрузки было осуществлено моделирование в программе «КАТРАН» частотного регулирования двигательной нагрузки 1 секции 10 кВ и сравнение коэффициентов регуливающего эффекта нагрузки до и после внедрения частотных преобразователей. Результаты данного вычислительного эксперимента приведены в **табл. 3**.

Таблица 3  
Коэффициенты 1 секции 10 кВ до и после внедрения частотных преобразователей

Параметры расчёта	До внедрения	После внедрения
$\Delta P_*/\Delta f_*$	3	0,175
$\Delta Q_*/\Delta f_*$	1,125	0,075
$\Delta P_*/\Delta U_*$	0,01	0,01
$\Delta Q_*/\Delta U_*$	10	0,055
$\Delta f_*/\Delta P_*$	0,33	5,71
$\Delta f_*/\Delta Q_*$	0,88	13,33
$\Delta U_*/\Delta P_*$	100	100
$\Delta U_*/\Delta Q_*$	0,1	18,18

Как видно, частотное регулирование электроприводов секции ведёт к снижению их регулирующего эффекта практически до нуля. Это может объясняться тем, что незначительные колебания напряжения или частоты сети практически не влияют на выходные значения частотного преобразователя, от которого могут питаться электродвигатели. Если оценивать данные результаты с точки зрения влияния на параметры режима, то можно однозначно отметить уменьшение положительного регулирующего эффекта нагрузки. В частности, у асинхронных двигателей с коэффициентом загрузки до 0,6 и вентиляторным сопротивлением на валу регулирующий эффект по напряжению положительный. Поэтому при снижении напряжения в точках питания двигателя он естественным путем снижает потребление активной и реактивной мощности и напряжение несколько восстанавливается. Этого не будет при питании двигателей через частотные преобразователи. Кроме того, при раздельной работе регулирующий эффект по частоте также снизится. При высокой нагрузке двигателя по активной мощности его регулирующий эффект реактивной мощности по напряжению может быть отрицательным. Тогда установка преобразователей будет оказывать положительное влияние на уровень напряжения в сети.

Следующим этапом данной работы было исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения сети при раздельной работе с энергосистемой. Данный режим был взят в силу того, что регулирующий эффект при его реализации оказывает максимальное влияние на уровень напряжения на шинах питающего распределительного устройства (в нашем случае это было распределительное устройство 10 кВ). В качестве источника питания был взят синхронный генератор мощностью 25 МВт. Результаты расчета сведены в **табл. 4**.

Как видим, если не учитывать регулирующий эффект нагрузки, то уровень напряжения сети будет отличаться от номинального значения на большую величину. Это связано с тем, что исследуемый узел оказался избыточным и без учета регулирующего эффекта нагрузки напряжения существенно повышались в силу неизменного характера нагрузки. С учетом регулирующего эффекта при повышении напряжения нагрузка также возрастала и напряжение естественным образом снижалось.

**Таблица 4**  
**Напряжения на секциях с учётом и без учёта регулирующего эффекта нагрузки**

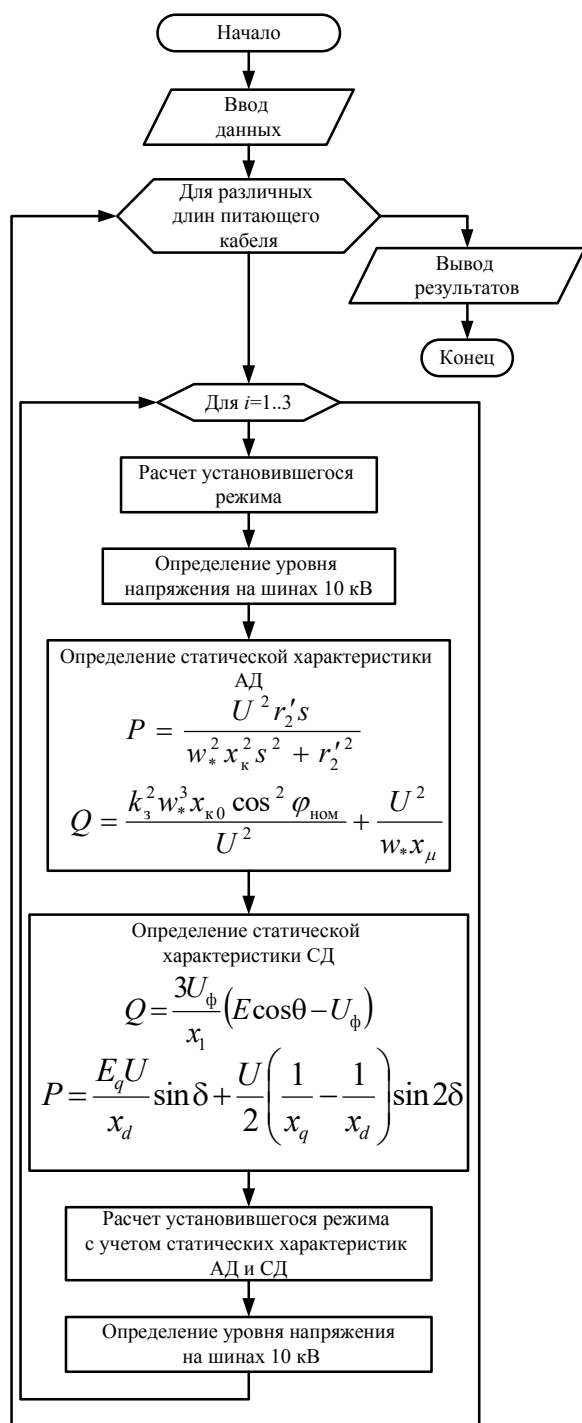
Секция	$U$ , кВ (с учётом РЭН)	$U$ , кВ (без учёта РЭН)
1 секция 10 кВ	11,97	12,23
2 секция 10 кВ	11,97	12,23
3 секция 10 кВ	11,97	12,23
1 секция 0,4 кВ	0,474	0,484
2 секция 0,4 кВ	0,474	0,484

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕНИЕ СЕТИ С УЧЁТОМ МОЩНОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПИТАЮЩЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Следующим этапом исследования было исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения на шинах цеховой подстанции с учетом мощности короткого замыкания от энергосистемы. Такая постановка задачи объясняется тем, что с целью упрощения расчетов часто при параллельной работе с энергосистемой учетом регулирующего эффекта пренебрегают или учитывают упрощенно. Интерес представляет определение степени разветвленности электрической сети с учетом мощности короткого замыкания энергосистемы, когда регулирующим эффектом нагрузки по напряжению пренебрегать не желательно. Алгоритм для решения поставленной задачи приведён на **рисунке**. Он включает в себя совокупность расчетов установившихся режимов исследуемой сети и определение уровня напряжения на 1 секции 10 кВ насосной станции при различной электрической удаленности нагрузки от энергосистемы с учётом статических характеристик электродвигателей. Расчет каждого установившегося режима ведется в три итерации. Изменение мощности короткого замыкания осуществлялось путем изменения длины питающего кабеля и, как следствие, сопротивления электрической связи с шагом 0,3 км. Составим таблицу изменения напряжения на шинах 10 кВ. Увеличение длины питающего кабеля приводит к увеличению его общего сопротивления, то есть сопротивления электрической связи между энергосистемой и исследуемой нагрузкой, что приводит к уменьшению тока короткого замыкания и, как следствие, мощности КЗ. Уменьшение  $S_{кз}$  приводит к большему влиянию регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения на шинах 10 кВ. Результаты расчетов сведены в **табл. 5**.

Очевидно, что учет регулирующего эффекта нагрузки (РЭН) в этом случае влияния не оказал. Однако при большей электрической удаленности потребителей от источника питания этот эффект будет заметнее. Таким образом, уровень питающего напряжения является функцией от трёх параметров: величины нагрузки, регулирующего эффекта и сопротивления электрической связи с энергосистемой.

Заключительным этапом исследования была оценка показателей статической устойчивости синхронных двигателей при различной мощности короткого замыкания энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки. При этом оценивались коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению  $k_{3U}$  и активной мощности  $k_{3P}$ . Результаты расчетов с учетом регулирующего эффекта нагрузки сведены в **табл. 6**, без учета статических характеристик нагрузки - в **табл. 7**. Как видим, показатели устойчивости во втором случае незначительно выше. Это объясняется тем, что напряжение, а следовательно, и электромагнитная максимальная мощность с учетом регулирующего эффекта нагрузки будут незначительно ниже. В целом учет данного фактора не является существенным.



Алгоритм анализа влияния регулирующего эффекта нагрузки на параметров режима с учетом мощности КЗ питающей сети

Таблица 5  
Напряжение на шинах 10 кВ с учётом и без учёта регулирующего эффекта нагрузки в зависимости от длины кабеля

$S_{кз}$ , МВА	$U$ , кВ	$U$ , кВ (без учёта РЭН)
152,4	10	10,02
143,69	9,95	9,97
132,06	9,64	9,68
120,07	9,46	9,64
108,99	9,67	9,69
99	9,72	9,74
90,28	9,77	9,78

Таблица 6  
Показатели статической устойчивости СД при учете РЭН

$S_{кз}$ , МВА	$k_{3U}$	$k_{3P}$
152,4	0,645	0,409
143,69	0,642	0,398
132,06	0,622	0,321
120,07	0,620	0,317
108,99	0,625	0,332
99	0,629	0,347
90,28	0,633	0,362

Таблица 7  
Показатели статической устойчивости СД без учёта РЭН

$S_{кз}$ , МВА	$k_{3U}$	$k_{3P}$
152,4	0,657	0,457
143,69	0,654	0,443
132,06	0,633	0,364
120,07	0,631	0,354
108,99	0,634	0,367
99	0,638	0,381
90,28	0,641	0,394

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы сделаны следующие выводы:

- 1) увеличение удаленности электрической нагрузки в промышленности от питающей сети и, как следствие, снижение мощности короткого замыкания приводит к большему влиянию регулирующего эффекта электроприёмников на напряжение ближайшей шины, от которой они питаются;
- 2) при снижении мощности короткого замыкания энергосистемы статическая устойчивость электрических машин снижается;
- 3) наличие разветвленной распределительной сети в виде трансформаторов, преобразователей и кабелей может существенно изменять регулирующий эффект нагрузки;
- 4) частотное регулирование двигательной нагрузки сводит её регулирующий эффект практически к нулю;
- 5) целесообразность учета регулирующего эффекта нагрузки увеличивается по мере снижения мощности короткого замыкания в условиях протяженной распределительной сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // Журнал Сибирского федерального университета. 2015. С. 795-801.
2. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Ю.В. Крохта, Ари Абдулла Р. Рахим, Л.С. Удут // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №4. С. 109-120.
3. Буланова О.В., Шорохов Д.В., Малафеев А.В. Разработка моделей электрических нагрузок для расчёта установившихся режимов систем электроснабжения (тезисы) // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф. агниогорск: МГТУ, 2002. С.8.
4. Анализ факторов, влияющих на статические характери-

- стики по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, И.А. Гусева, Г.Н. Васичкин // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. Вып. №12. С. 138-145.
5. Расчет статических характеристик по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, И.А. Гусева, Г.Н. Васичкин // Материалы 64-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2004-2005 гг.: сб. докл. Т. 2. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 101-103.
  6. Исследование статических характеристик потребителей металлургического производства / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, С.А. Ефимов, Ю.Ю. Зайцева // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 14. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 169-172.
  7. Влияние регулирующего эффекта нагрузки промышленного предприятия на параметры установившегося режима / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, С.А. Ефимов, Ю.Ю. Зайцева // Материалы 65-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2006-2007 гг.: Сб. докл. Т.2. Магнитогорск ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 32-34.
  8. Статические характеристики комплексной нагрузки металлургических предприятий / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, М.Н. Степанова // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 15. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. С. 225-228.
  9. Определение регулирующего эффекта двигателей постоянного тока с автономными инверторами / О.В. Буланова, В.М. Тарасов, М.А. Извольский, А.В. Малафеев // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб. тр. Всероссийск. конф. с элементами науч. шк. для молодежи. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 107-109.
  10. Определение регулирующего эффекта двигателей переменного тока с автономными инверторами / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов, М.А. Извольский, Ю.В. Ионов // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.2: сб. тр. Десятой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С.154-155.
  11. Готман В. И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчет установившихся режимов энергосистем // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 2011. 311. №4. С. 134-138.
  12. Тарасов В.М., Буланова О.В., Малафеев А.В. Исследование регулирующего эффекта двигателей постоянного тока, питающихся от тиристорных выпрямителей (тезис) // Тинчуринские чтения: материалы докл. 6 Междунар. молодежной науч. конф. Т.1. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. С. 135-136.
  13. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // Изв. вузов Электромеханика. 2011. №4. С. 115-118.
  14. T. Xu H.-Z. Kang Z.-C. Zhang Y.-H. Liu. Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side // Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control. 37(22):9-12+16 · November 2009.
  15. Madis Leinakse Hendrik Kiristaja Jako Kilter. Identification of Intra-Day Variations of Static Load Characteristics Based on Measurements in High-Voltage Transmission Network. // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), At Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712.
  16. Alexander Tavlintsev A.V. Pazderin Anton Suvorov Pavel Chusovitin. Experimental Investigation of Static Load Characteristics // Advanced Materials Research(Volumes 960-961). June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III. P. 969-973.
  17. Lidija Korunovic D. P. Stojanovic. The effects of normalization of static load characteristics // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. 28 June-2 July 2009.
  18. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золотов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №1. Энергетика. С. 54-59.
  19. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук, А.С. Тавлинцев // Известия Томского политехнического университета. Техника и технология в энергетике. 2014. Т. 325. №4. С. 164-175.
  20. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке / В.З. Ковалёв, А.Г. Щербаков, О.А. Петухова, А.А. Зябкин // Омский научный вестник. 2017. №5. С. 116-125.
  21. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 27-38.
  22. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 40-47.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### STUDY OF THE INFLUENCE OF REGULATING LOAD EFFECT ON THE VOLTAGE OF THE SUPPLY SUBSTATION TAKING INTO ACCOUNT THE POWER OF THE SHORT-CIRCUIT OF THE ENERGY SYSTEM

Ruslan M. Nigmatullin

An undergraduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-9358>

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lo-gan\_b\_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev\_av@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1471-9764>

Under the regulatory effect of the load we understand the change in the active and reactive capacities of the electric load due to changes in the parameters of the power system, voltage and frequency of the network preventing this disturbance. In practical calculations, the regulatory effect of the load is often neglected. With a significant distance of the load from the power system and the electrically branched network, the static characteristics of the load can have a significant impact on the parameters of the mode. This article proposes to evaluate the influence of the regulatory effect of the load on the voltage level of the network taking into account the value of short-circuit power. In the study, the electric network of the industrial object under study was modeled in the specialized KATRAN software complex and the regulatory effect of the load in question was determined. An algorithm for determining the effect of the power short-circuit power of the power system on the voltage on the buses of the power substation has been compiled. The parameters of the static stability of power consumers are determined taking into account the regulatory effect of the load. The work shows that an increase in the resistance of communication with the power system reduces the current power of the short circuit of the power system, which leads to a greater influence of the regulatory effect of the load on the level of the supply voltage. In the case of branched networks electrically remote from power supplies, this leads to the need for a detailed consideration of the regulatory effect of the load. Also, increasing the distance of the electrical load from the power system affects the stability indicators of electrical machines. In the work, the regulatory effect in various load nodes of the object was calculated, the influence of the frequency regulation of the main electric drives of the pumping station on the regulatory effect of the load was studied and the influence of the regulatory effect of the load on the level of the supply voltage was determined.

**Keywords:** load regulating effect, voltage, short circuit power, short-circuit current, power system, cable, resistance, network, load, static stability, power receiver.

#### REFERENCES

1. Filatov A. N., Syzganova E. Yu., Panteleev V. I., Petuhov R. A., Pilyugin, G. A. Static characteristics and methods of calculation steady-state modes of synchronous motors. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University]. 2015, pp. 795-801. (In Russian)
2. Odnokopylov Ivan G., Dementiev Yuri, Krochta Yuri, Ari, Abdullah R. RA-chem, Udu Leonid Stepanovich. Static limiting characteristics of the asynchronous electric drive with frequency vector control // *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Herald of SUSU. "Energy" Series]. 2018. Vol. 18, no. 4, pp. 109-120. (In Russian)
3. Bulanova O.V., Shorokhov, D. V., Malafeev A.V. Modelling of electric loads for calculation of the established modes of power supply systems (abstract). *Energetiki i metallurgii nastoyashchemu i budushchemu Rossii: Tez.dokl. 3-y Vseros. nauch.-tekhn. Konf.* [Energy and metallurgy present and future of Russia: abstracts of reports of 3rd all-Russian scientific.-tech. Conf]. Magnitogorsk: MGTU, 2002. P. 8. (In Russian)
4. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. Analysis of factors affecting static conductive characteristics of frequency-voltage consumers of metallurgical production (article) / *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhevuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electrical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Magnitogorsk, GOU VPO "MGTU", 2006. Vol. No. 12. P. 138-145. (In Russian)
5. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. Calculation of static characteristics of frequency-voltage consumers of metallurgical production (article) *Materialy 64-y nauch.-tekhn. Konf. Po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2004-2005 gg.: Sb. Dokl. T.2* [Materials of the 64th scientific.-tech. Conf. according to the results of scientific research in 2004-2005: Collection of scientific reports. Vol. 2]. Magnitogorsk: GOU VPO "MGTU", 2006. P. 101-103. (In Russian)
6. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Efimov S.A., Zaytseva Y.Y. Study of the static characteristics of consumers of metallurgical production (article), *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhevuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electro-technical systems and complexes: Interuniversity collection. SB. nauch. Tr.] Vol. 14. Magnitogorsk: GOU VPO "MGTU", 2007. P. 169-172. (In Russian)
7. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Efimov S.A., Zaytseva Y.Y. the Influence of the regulating effect of loading industrial enterprises on the parameters of the installation stopped still mode (article). *Materialy 64-y nauch.-tekhn. Konf. Po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2006-2007 gg.: Sb. Dokl. T.2.* [Proceedings of the 65th scientific.-tech. Conf. according to the results of scientific research for 2006-2007. Vol. 2]. Magnitogorsk GOU VPO "MGTU", 2007. P. 32-34. (In Russian)
8. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Stepanova M.N. Static characteristics the comprehensive load of metallurgical enterprises (article) *Elektotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhevuz. Sb. Nauch. Tr.* [Electrical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers]. Vol. 15. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU, 2008. P. 225-228. (In Russian)
9. Bulanova O.V., Tarasov V. M., Izvolsky M. A., Malafeev A.V. Determination of the regulatory effect of DC motors supplied from uncontrolled rectifiers in planned regimes (article). *Nauchno-issledovatel'skie problemy v oblasti energetiki i energosberezheniya: Sb. Tr. Vserossiysk. Konf. s elementami nauch. Shk. Dlya molodezhi i* [Research issues in the field of energy and energy conservation: collection of scientific papers of the All-Russian conference with workshops for the youth]. Ufa: UGATU, 2010. P. 107-109. (In Russian)
10. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu. N., Tarasov V.M., Izvolsky M.A., Ionova Y.V. Determination of the regulatory effect of AC motors with auxiliary inverters (article). *Vysokie tekhnologii, fundamentalnye i prikladnye issledovaniya, obrazovanie. T. 2. Sb. Tr. Desyatoy Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. «Issledovanie, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologiy v promyshlennosti»* [High technologies, fundamental and applied researches, education. Vol. 2: collection of scientific papers of the tenth Intern. scientific.-pract. Conf. "Research, development and application of high technologies in industry"]. St. Petersburg: Publishing house of Polytechnical Institute. University press, 2010. P. 154-155. (In Russian)

11. Gotman V. I. Common algorithm of static stability estimation and calculation of the established modes of energy systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University]. 2007. Vol. 2011. 311. No. 4. P. 134-138. (In Russian)
12. Tarasov V.M., Bulanov O.V., Malafeev A.V. Study of govern-present the effect of DC motors fed from thyristor rectifiers (thesis). *Tinchurinskie chteniya: Materialy dokl. 6 Mezhdunar. Molodezhnoi nauch. Konf. T.1 - Kazan* [Tinchurin readings: Materials of reports of 6 Intern. youth scientific. Conf. Vol. 1. Kazan: Kazan. State Power University, 2011. P. 135-136. (In Russian)
13. Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanov O.V., Kondrashov Yu.N., Tarasov V.M. Regulatory effect rectifier load to determine the parameters of the established modes of power supply systems of industrial enterprises (article). *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2011. No. 4. P. 115-118. (In Russian)
14. T. Xu, H.-Z. Kang Z.-C. Zhang Y.-H. Liu. Influence of voltage regulating and control mode for power type of load on voltage stability of load side. // *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*. 37(22):9-12+16 • November 2009.
15. Madis Leinakse Hendrik Kiristaja Jako Kilter. Identification of Intra-Day Variations of Static Load Characteristics Based on Measurements in High-Voltage Transmission Network // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), At Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712.
16. Alexander Tavlintsev A. V. Pazderin Anton Suvorov Pavel Chusovitin. Experimental Investigation of Static Load Characteristics. // *Advanced Materials Research*(Volumes 960-961). June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III. P. 969-973.
17. Lidija Korunovic, D. P. Stojanovic. The effects of normalization of static load characteristics // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. 28 June-2 July 2009.
18. Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zolov B.P. Determination of the static characteristics of the power loads of network nodes on the basis of active experiment. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. [Proceedings of Universities. The North Caucasus region. Technical Sciences]. 2015. No. 1. Energy. P. 54-59. (In Russian)
19. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tulentsev A.S. Method of identifying load static characteristics according to the results of the experiment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologiya v energetike* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering and technology in the energy sector]. 2014. V. 325. No. 4. P. 164-175. (In Russian)
20. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Petukhova O.A., Zyabkin A.A. The effect of deviation of the parameters of an asynchronous machine on its static characteristics under fan load. *Omskiy nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2017. No. 5. pp. 116-125. (In Russian)
21. Gazizova O.V., Kondrashova YU.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. (In Russian)
22. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeyev A.V. The question context of saturation in the mathematical model industrial generator for calculation of transition mode in the power complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 40-47. (In Russian)

Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 19-25. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25)

Nigamatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeev A.V. Study of the Influence of Regulating Load Effect on the Voltage of the Supply Substation Taking into Account the Power of the Short-Circuit of the Energy System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 19-25. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(47\)-19-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(47)-19-25)