

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ НА УРОВЕНЬ ЧАСТОТЫ СЕТИ ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

О.В. Газизова<sup>1</sup>, Р.М. Нигаматуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,

<sup>2</sup> АО «Магнитогорскгражданпроект», г. Магнитогорск, Россия

В связи с ужесточением требований к качеству электрической энергии актуальным становится оценка влияния различных факторов на основные показатели качества: отклонения напряжения и частоты сети. Одним из таких факторов являются статические характеристики различных нагрузок, которые при определенных режимах могут оказывать существенное влияние на параметры энергосистемы. В данной статье предлагается оценить влияние статических характеристик на уровень частоты сети при выходе ее на раздельную работу с энергосистемой и при различных изменениях установившегося режима, а также исследовать зависимость между коэффициентами регулирующего эффекта нагрузки и значением мощности короткого замыкания или длины питающего кабеля. Раздельная работа была взята в силу того, что в данном режиме влияние регулирующего эффекта мощной нагрузки на параметры режима становится более выраженным. Научная новизна работы состоит в составлении алгоритма, позволяющего производить уточнение отклонения частоты изолированной электроэнергетической системы с учетом и без учета СХН при изменении длины питающего кабеля в программном комплексе «КАТРАН». Основным результатом работы является выявленная практически прямая зависимость между влиянием статических характеристик нагрузки на частоту сети и удаленностью нагрузки с большой долей синхронных двигателей от источника питания при автономно работающей электроэнергетической системе. Также была оценена целесообразность учета регулирующего эффекта нагрузки при расчете электрических режимов в зависимости от рода нагрузки и расчетного значения мощности короткого замыкания.

*Ключевые слова:* статические характеристики нагрузки, регулирующий эффект нагрузки, частота, напряжение, энергосистема, качество электроэнергии, режим.

### Введение

Статические характеристики показывают зависимость активной или реактивной мощностей нагрузки от напряжения или частоты сети. Потребляемая мощность может меняться с изменением данных параметров энергосистемы и в свою очередь оказывать на них обратное влияние, исходя из уравнений балансов мощностей. Отсюда возникает новое понятие – регулирующий эффект нагрузки.

Регулирующим эффектом называется степень изменения мощности исследуемой нагрузки при изменении напряжения или частоты сети. Регулирующие коэффициенты находятся как отношение изменения активной или реактивной мощности нагрузки к изменению напряжения или частоты сети в относительных единицах.

Коэффициенты регулирующего эффекта показывают степень влияния изменения параметров сети на изменение параметров нагрузки или на сколько процентов изменится мощность нагрузки при изменении 1 % напряжения или частоты энергосистемы. Их величина во многом зависит от состава нагрузки и рода электроприемников.

В настоящее время оценке регулирующего эффекта промышленных нагрузок посвящено большое количество научных трудов: [1–6]. В них ис-

следуются регулирующие эффекты промышленных цехов в целом и отдельных электроприемников в частности, таких как электродвигатели с различными типами регулирования. Немало трудов посвящены влиянию статических характеристик нагрузки на параметры режима энергосистем: [1, 7–11]. Как правило, речь идет о влиянии на уровень напряжения сети. Отдельно стоит выделить статью [12], в которой исследуется влияние СХН на некоторые параметры изолированной энергосистемы: напряжение и активную мощность в узлах сети. В трудах [13–23] изложены вопросы определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам с использованием как активного, так и пассивного эксперимента.

На основании ныне существующих научных работ можно прийти к выводу, что на данный момент недостаточно хорошо проработаны вопросы влияния регулирующих эффектов нагрузки на параметры сети при раздельной работе с энергосистемой и, в частности, на наиболее важный параметр: уровень частоты переменного тока. Также не исследована зависимость между удаленностью нагрузки от источника и степенью влияния СХН на основные показатели качества электроэнергии:

отклонения напряжения и частоты от номинальных значений. Раздельная с энергосистемой работа является наиболее важным для рассмотрения режимом в этом плане, поскольку именно при нем регулирующий эффект нагрузки может оказывать более видимое влияние на параметры режима, включая частоту.

С целью ликвидации этих пробелов в данной статье предлагается оценить влияние регулирую-

щего эффекта мощной нагрузки на уровень частоты изолированной ЭЭС при различной длине питающего кабеля и исследовать зависимость коэффициентов РЭН от значения мощности короткого замыкания энергосистемы, которое можно регулировать посредством изменения сопротивления связи. Для основной задачи был составлен алгоритм расчета установившегося режима в программном комплексе «КАТРАН» (рис. 1).

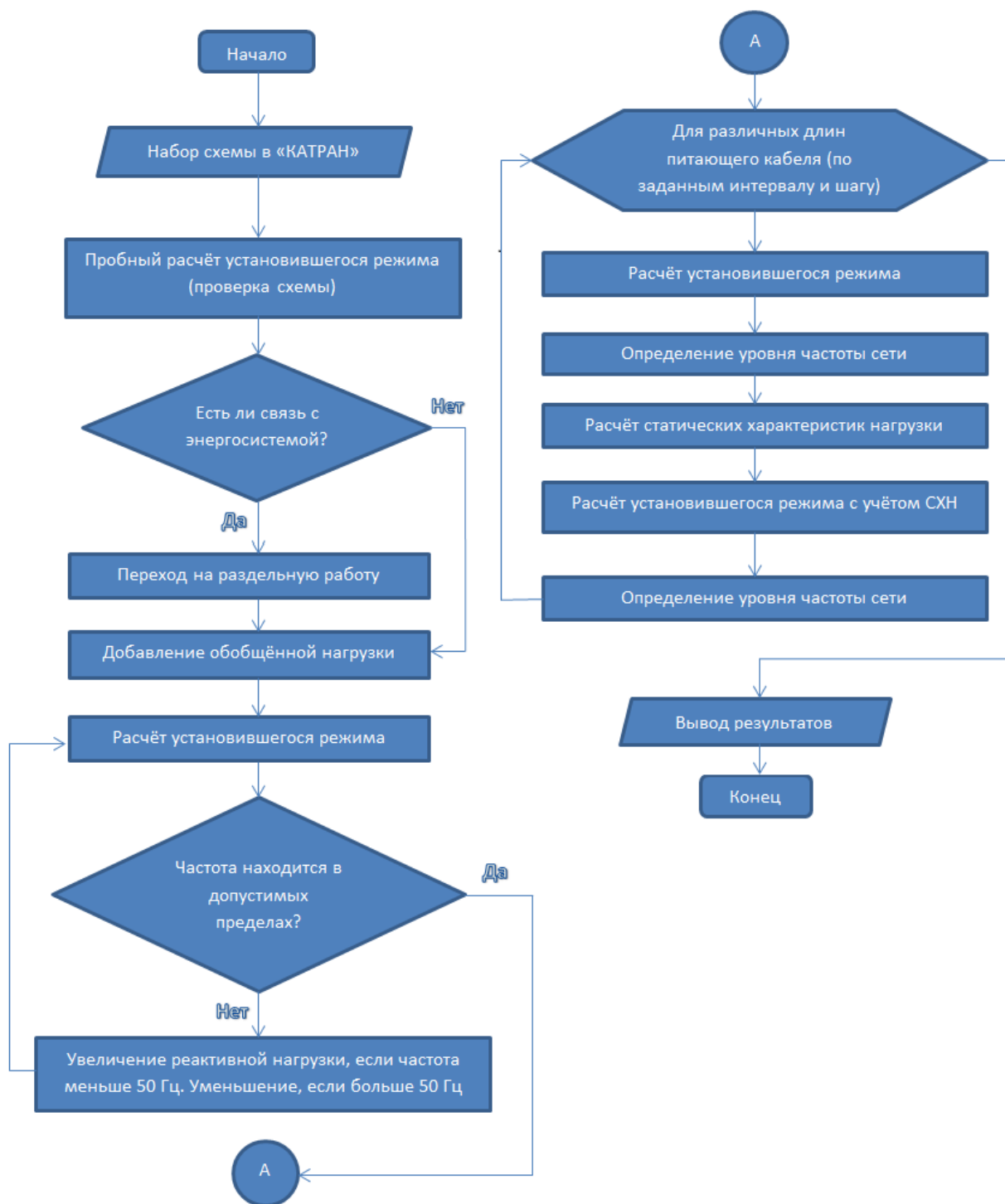


Рис. 1. Алгоритм расчета

Алгоритм предполагает повторение действия по расчету режима и снятия частоты сети с учетом и без учета СХН при различных длинах питающего кабеля для получения массива данных. Иногда в программах, подобных «КАТРАН», возникает необходимость добиться нормального уровня частоты при раздельной работе с энергосистемой, так как в них зачастую не предусмотрены автоматические регуляторы скорости и возбуждения синхронных генераторов. Алгоритм предполагает регулировать ее посредством изменения реактивной нагрузки. При увеличении реактивной мощности потребителя напряжение сети снижается, что приводит к снижению потребляемой двигателями активной мощности и, как следствие, повышению уровня частоты, зависящей от баланса активной мощности в системе. При этом иногда приходится изменять и активную нагрузку таким образом, чтобы в паре с реактивной нагрузкой на нормальном уровне находилось и напряжение сети при раздельной работе.

Комплекс автоматизированного режимного анализа «КАТРАН» был создан на базе кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета. Адекватность продукта подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [23]. «КАТРАН» отличается более специализированным назначением по сравнению с более популярными программами такого типа (например, MATLAB-Simulink), поскольку предназначен именно для расчета режимов электрических систем промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные электростанции, включая расчеты с учетом и без учета СХН. Следовательно, данный продукт является наиболее удобным для решения представленной в статье задачи.

### 1. Оценка влияния СХН на частоту сети при раздельной работе с энергосистемой

Для этой цели в программном комплексе «КАТРАН» была смоделирована система «источник – сеть – нагрузка». В качестве источника здесь выступает синхронный генератор ЦЭС номинальной мощностью 25 МВт. Сеть – кабель, играющий роль связи между источником и нагрузкой. Нагрузкой выступает насосная станция 1А цеха водоснабжения ПАО «ММК» с установленной двигательной мощностью 14,6 МВт. Также в программе была добавлена обобщенная реактивная нагрузка мощностью 7,25 Мвар, чтобы можно было добиться реальных значений частоты. Однолинейная схема станции приведена на рис. 2.

Программный комплекс «КАТРАН» позволяет моделировать электрическую сеть и производить расчет установившихся режимов систем. Для этого в нем используется метод последовательного эквивалентирования, который применяется для

расчетов систем электроснабжения с собственными источниками электроэнергии. Он основан на представлении разнородных элементов схемы одинаковыми схемами замещения с ЭДС и проводимостями без выделения вращающихся машин и пассивной нагрузки.

Далее в программе мы изменяли длину питающего кабеля с шагом 0,5 км и в каждом случае снимали значение частоты сети с учетом и без учета влияния статических характеристик двигательной нагрузки. Результат исследования приведен в табл. 1.

К частоте сети предъявляются наиболее строгие требования по качеству электроэнергии. Согласно последним нормативам, предельно допустимое отклонение частоты допускается не более 0,4 Гц от номинального значения, поэтому даже малейшее влияние нагрузки на этот параметр может оказаться решающим.

Обладая практически бесконечным резервом и автоматическими регуляторами скорости СГ, единая энергосистема может ликвидировать дефицит или избыток активной мощности в любом энергорайоне, поэтому статические характеристики даже самых мощных нагрузок не могут оказывать на частоту сети видимого влияния. Однако при отделении районной системы с собственными источниками от общей энергосистемы регулирующий эффект нагрузки может оказывать воздействие на этот параметр. Особенно это может быть заметно, когда речь идет о промышленных нагрузках.

Из полученных данных мы можем увидеть, что нагрузка исследуемой ЭЭС стремится вернуть избыточную частоту на номинальный уровень (50 Гц). При этом ее влияние на этот параметр возрастает с увеличением удаленности от источника питания. Скажем, при увеличении длины питающего кабеля с 0,5 до 3,5 км доля регулирующего эффекта нагрузки в частоте возрастает с 0,04 до 0,07 %, что является весомым для данного показателя и может оказать критическое воздействие при дальнейшем увеличении длины. Чтобы наглядно это увидеть, составим график изменения частоты с учетом и без учета влияния СХН (рис. 3).

Можно также заметить, что с увеличением длины кабеля частота сети сначала возрастает, а затем, при достижении определенного показателя, снова начинает снижаться. Также и регулирующий эффект сначала возрастает, а затем начинает снижаться. Это может являться следствием наличия в нагрузке синхронных двигателей, которые при изменении режима могут начать оказывать обратное влияние на параметры системы, так как они имеют параболическую статическую характеристику реактивной мощности по частоте и напряжению энергосистемы. Наилучший регулирующий эффект исследуемого объекта достигается при длине кабеля в 3,5–4 км.



Таблица 1

Частота изолированной ЭЭС с учетом и без учета регулирующего эффекта нагрузки при различной длине питающего кабеля

$l_k$ , км	$f$ , Гц	$f$ (без учета РЭН), Гц	$\Delta f$ , Гц
0,5	50,115	50,135	0,020
1,0	50,230	50,251	0,021
1,5	50,310	50,333	0,023
2,0	50,365	50,389	0,024
2,5	50,401	50,427	0,026
3,0	50,422	50,452	0,030
<b>3,5</b>	<b>50,433</b>	<b>50,468</b>	<b>0,035</b>
<b>4,0</b>	<b>50,438</b>	<b>50,473</b>	<b>0,035</b>
4,5	50,438	50,472	0,034
5,0	50,433	50,465	0,032

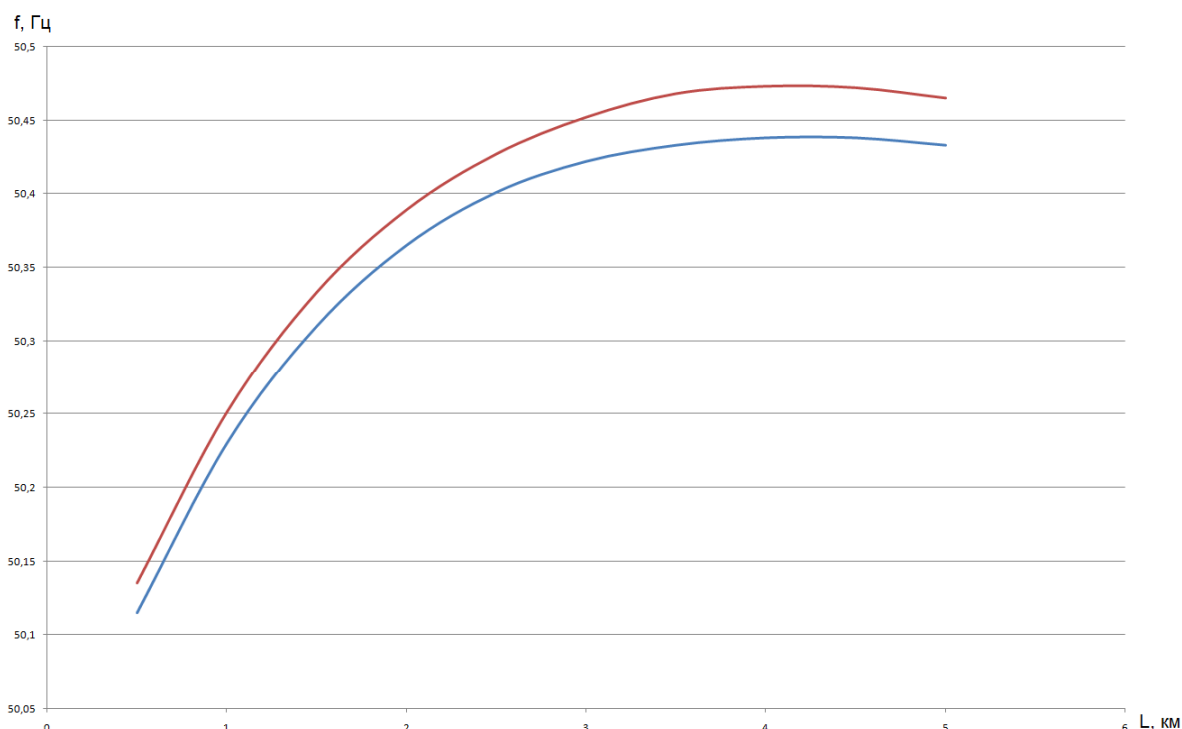


Рис. 3. Частота изолированной системы в зависимости от длины кабеля (синий – с учетом СХН, красный – без учета СХН)

Если мы отключим от сети все синхронные двигатели, оставив только асинхронные, и снова проведем тот же эксперимент, то величина регулирующего эффекта нагрузки практически не будет зависеть от длины кабеля, составляя примерно 0,007–0,008 Гц, и заметно снизится. Поэтому можно сказать, что целесообразность учета СХН при расчете установившихся режимов электрических систем увеличивается по мере увеличения доли СД в нагрузке, способных оказывать более непредсказуемое влияние на параметры режима.

## 2. Исследование зависимости регулирующих коэффициентов от мощности короткого замыкания энергосистемы

Для этой цели мы сняли коэффициенты РЭН в трех точках исследуемой сети при различном зна-

чении мощности короткого замыкания от энергосистемы и в четырех разных режимах. Мощность КЗ мы регулировали посредством изменения длины питающего кабеля и, как следствие, сопротивления связи между источником и потребителем. Были рассмотрены 3-я секция 10 кВ насосной станции с учетом и без учета кабеля и 2-я секция 0,4 кВ. Получено большое количество идентичных таблиц с разными режимами. Пример показан в табл. 2.

Исходя из полученных данных, мы можем прийти к выводу, что коэффициенты регулирующего эффекта активной мощности по частоте и напряжению сети с изменением мощности КЗ остаются неизменными, а коэффициенты реактивной мощности заметно изменяются. При этом коэффициент по частоте возрастает с увеличением мощ-

Таблица 2

Коэффициенты РЭН 3-й секции 10 кВ без учета питающего кабеля.  
Номинальный режим

$S_{КЗ}$ , МВА	$k_{(P;f)}$	$k_{(Q;f)}$	$k_{(P;U)}$	$k_{(Q;U)}$	$U$ , кВ
150	2,73	0,41	0	18,41	10,19
250	2,73	0,99	0	14,05	10,32
350	2,73	1,14	0	12,83	10,37
450	2,73	1,22	0	12,19	10,4
550	2,73	1,26	0	11,86	10,42
650	2,73	1,29	0	11,6	10,43
750	2,73	1,31	0	11,46	10,44
850	2,73	1,32	0	11,31	10,45
950	2,73	1,33	0	11,24	10,45

ности КЗ, а коэффициент по напряжению снижается. Напряжение на шинах же ожидаемо становится больше с увеличением мощности короткого замыкания, поскольку в данном случае мы считали РЭН с учетом падения напряжения на кабеле (за кабелем от источника), которое возрастает с увеличением сопротивления этого кабеля. Регулирующий коэффициент активной мощности нагрузки по напряжению равен нулю, то есть активная мощность двигателей насосной станции в нашем случае никак не изменяется с изменением данного параметра электрической системы.

Другими словами, наименьшее влияние регулирующего эффекта реактивной нагрузки по частоте на параметры режима наблюдается при наименьшем исследованном значении мощности КЗ – 150 МВА, наибольшее – при 950 МВА. Регулирующий эффект той же мощности по напряжению имеет наибольшее влияние в данном случае при мощности КЗ 150 МВА.

Полученные результаты могут говорить о том, что при больших расчетных значениях мощности короткого замыкания СХН будут оказывать наименьшее влияние на уровень напряжения сети.

И наоборот. Поэтому целесообразность учета РЭН при расчете режимов возрастает со снижением мощности короткого замыкания.

### Вывод

При расчете режимов часто пренебрегают тем фактом, что потребляемая мощность может значительно меняться даже при небольших изменениях параметров сети, считая нагрузку условно неизменной. Программный расчет по составленному в статье алгоритму позволит уточнить наиболее важный показатель качества электроэнергии (отклонение частоты) автономно работающей электроэнергетической системы и оценить величину влияния СХН на этот показатель в зависимости от изменения состояния системы (например, длины питающего кабеля). В связи с этим могут быть даны также рекомендации по оптимизации режимов электрических систем по условию минимума отклонения частоты при раздельной работе с питающей энергосистемой. Алгоритм может быть полезен диспетчерским службам промышленных электрических систем, имеющих в своем составе собственные источники электроэнергии.

### Литература

1. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 115–118.
2. Панкратов, А.В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11–20. DOI: 10.14529/power150102
3. Определение регулирующего эффекта двигателей переменного тока с автономными инверторами / А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов и др. // 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.
4. Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side / T. Xu, H.-Z. Kang, Z.-C. Zhang, Y.-H. Liu // Power System Protection and Control. – 2009. – Vol. 37 (22). – P. 9–12.
5. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, Н.В. Иванов, И.Ф. Бураков, Б.П. Золоев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 54–58.

6. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев и др. // *Научное обозрение*. – 2013. – № 7. – С. 77–79.
7. Малафеев, А.В. Влияние регулирующего эффекта нагрузки промышленного предприятия на параметры установившегося режима / А.В. Малафеев, С.А. Ефимов, Ю.Ю. Зайцева // *Материалы 65-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2006–2007 гг.: сб. докл.* – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – Т. 2. – С. 32–34.
8. Готман, В.И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчет установившихся режимов энергосистем / В.И. Готман // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311, № 4. – С. 134–138.
9. Madis Leinakse. Identification of Intra-Day Variations of Static Load Characteristics Based on Measurements in High-Voltage Transmission Network / Madis Leinakse, Hendrik Kiristaja, Jako Kilter // *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), At Sarajevo, Bosnia and Herzegovina*. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712
10. Борисов, Р.И. К единому алгоритму расчета статической устойчивости и изменений установившегося режима электрической системы / Р.И. Борисов, В.И. Готман, Ю.В. Хрущев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 1972. – Т. 227. – С. 102–113.
11. Готман, В.И. Обобщенные статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны / В.И. Готман // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2007. – № 4. – С. 131–134.
12. Вытнова, Н.И. Оценка степени влияния статических характеристик нагрузки по напряжению на расчетные параметры установившихся режимов калининградской энергосистемы в автономном режиме ее работы / Н.И. Вытнова, А.Ю. Никишин // *Вестник молодежной науки*. – 2018. – № 2. – С. 1–6.
13. Дзюба, М.А. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента / М.А. Дзюба, В.В. Тарасенко, А.В. Коржов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 28–35. DOI: 10.14529/power180204
14. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев и др. // *Журнал Сибирского федерального университета*. – 2015. – № 6. – С. 795–801. DOI: 10.17516/1999-494x-2015-8-6-795-801
15. Tavlintsev, A. Experimental Investigation of Static Load Characteristics / A. Tavlintsev, A.V. Pazderin, A. Suvorov, P. Chusovitin // *Advanced Materials Research, June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III*. – 2014. – Vol. 960–961. – P. 969–973. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.960-961.969
16. Korunovic, L.M. The effects of normalization of static load characteristics / L.M. Korunovic, D.P. Stojanovic // *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. – 2009. DOI: 10.1109/ptc.2009.5281826
17. Статические предельные характеристики асинхронного электропривода при частотном векторном управлении / И.Г. Однокопьев, Ю.Н. Деметьев, Ю.В. Крохта и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 109–120. DOI: 10.14529/power180412
18. Буланова, О.В. Разработка моделей электрических нагрузок для расчета установившихся режимов систем электроснабжения / О.В. Буланова, Д.В. Шорохов, А.В. Малафеев // *Энергетики и металлургии настоящего и будущего России: тез. докл. 3-й Всерос науч.-техн. конф.* – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – С. 8.
19. Анализ факторов, влияющих на статические характеристики по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова и др. // *Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр.* – Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – Вып. 12. – С. 138–145.
20. Игуменцев, В.А. Расчет статических характеристик по частоте и напряжению потребителей металлургического производства / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, И.А. Гусева, Г.Н. Васичкин // *Материалы 64-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2004–2005 гг.: сб. докл.* – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – Т. 2. – С. 101–103.
21. 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.* – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – Вып. 14. – С. 169–172.
22. 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.* – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – Вып. 15. – С. 225–228.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019610251 Российская Федерация. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, М.А. Малафеев, Е.А. Панова и др.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Носова. – № 2018661952; заявл. 29.10.2018; опубл. 10.01.2019.

Газизова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Носова, г. Магнитогорск; logan\_b\_7@mail.ru.

Нигаматуллин Руслан Миратович, инженер, АО «Магнитогорскгражданпроект», г. Магнитогорск; nigamatullin\_ruslan@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 августа 2020 г.

DOI: 10.14529/power200406

## EVALUATION OF THE EFFECT OF STATIC LOAD CHARACTERISTICS ON THE LEVEL OF FREQUENCY DURING SEPARATE OPERATIONS WITH THE GRID

O.V. Gazizova<sup>1</sup>, logan\_b\_7@mail.ru,  
R.M. Nigmatullin<sup>2</sup>, nigamatullin\_ruslan@mail.ru

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> JSC "Magnitogorsk Civil Project", Magnitogorsk, Russian Federation

Due to the requirements for the quality of electrical energy becoming stricter, it is now relevant to assess the impact of various factors on the main quality indicators: voltage and frequency deviations of the network. One of these factors is the static characteristics of various loads, which under certain conditions can have a significant impact on the parameters of the power system. In this article, it is proposed to evaluate the influence of static characteristics on the network's frequency level when it enters separate operation with the power system and with various changes in the steady-state mode, and also to investigate the relationship between the coefficients of the load regulating effect and the value of the short-circuit power or the length of the supply cable. Separate operation was considered because in this mode, the influence of the regulating effect of a powerful load on the mode parameters becomes more pronounced. The scientific novelty of this study consists in an algorithm that allows refining the frequency deviation of an isolated electric power system, taking into account and without taking into account the static load characteristics when changing the length of the supply cable in the KATRAN software package. The main result of this study is the almost direct relationship revealed between the influence of static load characteristics on the network frequency and the distance of the load with a large proportion of synchronous motors from the power source in an autonomous electric power system. We also evaluated the feasibility of taking the regulatory effect of the load into account when calculating electrical modes depending on the type of load and the calculated value of the short-circuit power.

*Keywords:* static load characteristics, regulating effect of the load, frequency, voltage, power system, power quality, mode.

### References

1. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. [Assessment of the regulating effect of the rectifier load for determining the parameters of the established modes of power supply systems of industrial enterprises]. *News of higher educational institutions. Electromechanics*, 2011, no. 4, pp. 115–118. (in Russ.)

2. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150102

3. Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M., Izvolsky M.A., Ionova Yu.V. [Determination of the regulating effect of AC motors with Autonomous inverters]. *High technologies, fundamental and applied research, education, vol. 2: Sat. tr. of the tenth international conference. scientific-practical conf. "Research, development and application of high technologies in industry"*. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2010, pp. 154–155.

4. Xu T., Kang H.-Z., Zhang Z.-C., Liu Y.-H. Influence of voltage regulating and control mode for power type load on voltage stability of load side. *Power System Protection and Control*, 2009, no. 37 (22), pp. 9–12.



5. Kravchenko V.F., Ivanov N.V., Burakov I.F., Zolotoyev B.P. [Determination of static characteristics of power loads of network nodes based on active experiment]. *News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, 2015, no. 1, pp. 54–58. (in Russ.)
6. Pazderin A.V., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Chusovitin P.V., Yudin A.V. [Determining the static characteristics of large load nodes]. *Scientific Review*, 2013, no. 7, pp. 77–79. (in Russ.)
7. Malafeev A.V., Efimov S.A., Zaitseva Yu.Yu. [Influence of the regulating effect of the industrial enterprise load on the parameters of the established regime]. *Materials of the 65th scientific-technical conf. according to the results of scientific research in 2006–2007: Sat. dokl. Magnitogorsk GOU VPO “MSTU”*, 2007, vol. 2, pp. 32–34. (in Russ.)
8. Gotman V.I. [Common Algorithm of Static Stability Estimation and Computation of the Established Modes of Power Supply Systems]. *News of Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 134–138. (in Russ.)
9. 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*. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571712.
10. Borisov R.I., Gotman V.I., Khrushchev Yu.V. [To a unified algorithm for calculating static stability and changes in the established mode of the electrical system]. *News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 1972, vol. 227, pp. 102–113. (in Russ.)
11. Gotman, V.I. [Generalized static characteristics of electric power subsystems and their steepness coefficients]. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*, 2007, no. 4, pp. 131–134. (in Russ.)
12. Vytnova N.I., Nikishin A.Yu. [Assessment of the degree of influence of static characteristics of the load on the voltage on the calculated parameters of the established modes of the Kaliningrad power system in the Autonomous mode of its operation]. *Bulletin of Youth Science*, 2018, no. 2, pp. 1–6. (in Russ.)
13. Dziuba M.A., Tarasenko V.V., Korzhov A.V. Method for Determining of Voltage Steady-State Load Characteristics with Subject to the Limitation on Sensitive Parameters and Electrical Safety of Active Experiment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 28–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180204
14. Filatov A.N., Sizganova E.Yu., Panteleev V.I., Petukhov R.A., Pilyugin G.A. [Static characteristics and methods for calculating steady-state modes of synchronous motors]. *Journal of the Siberian Federal University*, 2015, no. 6, pp. 795–801. (in Russ.) DOI: 10.17516/1999-494x-2015-8-6-795-801
15. Tavlintsev Alexander, Pazderin A.V., Suvorov Anton, Chusovitin Pavel [Experimental Investigation of Static Load Characteristics]. *Advanced Materials Research*, June 2014. Thermal, Power and Electrical Engineering III, vol. 960–961, pp. 969–973. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.960-961.969
16. Korunovic Lidija, Stojanovic D.P. [The effects of normalization of static load characteristics]. *2009 IEEE Bucharest PowerTech, 28 June – 2 July, 2009*. DOI: 10.1109/ptc.2009.5281826
17. Odnokopylov I.G., Dementiev Yu.N., Krokhta Yu.V., Ari Abdula R. Rakhim, Udut L.S., Umurzakova A.D. Static Limiting Characteristics of Induction Motor Drive with Frequency Vector Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 109–120. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180412
18. Bulanova O.V., Shorokhov D.V., Malafeev A.V. [Development of models of electric loads for calculating steady-state modes of power supply systems]. *Energetics and metallurgists to the present and future of Russia: Tez. 3rd all-Russian scientific and technical conference*. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2002, p. 8. (in Russ.)
19. Igumenshev V. A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. [Analysis of factors affecting static characteristics by frequency and voltage of consumers of metallurgical production]. *Electrotechnical systems and complexes: Mezhvuz. sb. nauch. tr.* Magnitogorsk, GOU VPO “MSTU”, 2006, iss. 12, pp. 138–145. (in Russ.)
20. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Guseva I.A., Vasichkin G.N. [Calculation of static characteristics by frequency and voltage of consumers of metallurgical production]. *Materials of the 64th scientific-technical conf. according to the results of research works for 2004–2005: Sat. dokl.* Magnitogorsk, GOU VPO “MSTU”, 2006, vol. 2, pp. 101–103. (in Russ.)
21. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Efimov S.A., Zaitseva Yu.Yu. [Research of static characteristics of consumers of metallurgical production]. *Electrotechnical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers*. Magnitogorsk, GOU VPO “MSTU”, 2007, iss. 14, pp. 169–172. (in Russ.)
22. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Stepanova M.N. [Static characteristics of the complex load of metallurgical enterprises]. *Electrotechnical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific papers*. Magnitogorsk: GOU VPO “MSTU”, 2008, iss. 15, pp. 225–228. (in Russ.)

23. Igumenshchev V.A., Malafeyev M.A., Panova E.A. et al. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [The automated modal analysis KATRAN 10.0]. Patent RF, no. 2019610251, 2019.

*Received 3 August 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Газизова, О.В. Оценка влияния статических характеристик нагрузки на уровень частоты сети при отдельной работе с энергосистемой / О.В. Газизова, Р.М. Нигаматуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 54–63. DOI: 10.14529/power200406

#### FOR CITATION

Gazizova O.V., Nigamatullin R.M. Evaluation of the Effect of Static Load Characteristics on the Level of Frequency during Separate Operations with the Grid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 54–63. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200406

---