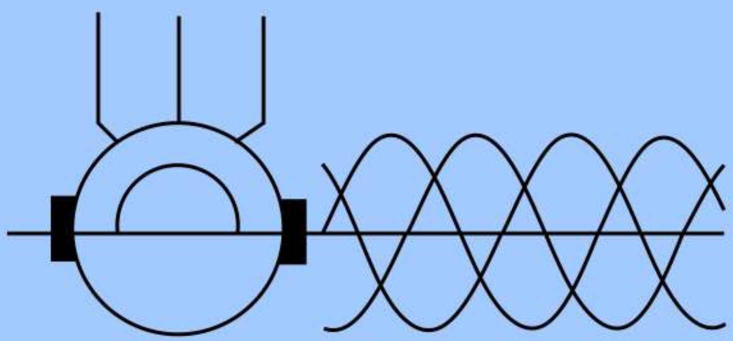
ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№4(49), 2020

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г. № 4(49), ДЕКАБРЬ 2020

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.
Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)
16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:
455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38, ауд. 342а, ФГБОУ ВО «МГТУим. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Адрес издателя:
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

Адрес типографии:
455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 28.12.2020. Заказ 368. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996 NO. 4(49), DEC, 2020

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).
Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014.
Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)
16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:
Nosov Magnitogorsk State Technical University
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
NMSTU publishing center

The editorial office:
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 28.12.2020. Order 368. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-4-10

Красильникова Т.Г.[1], Махмудов К.А.[1], Сафаралиев М.Х.[2]

[1]Новосибирский государственный технический университет
[2]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Анализ ликвидации неустойчивых двухфазных коротких замыканий в транспонированных линиях СВН в цикле двухфазного автоматического повторного включения

В данной статье дискутируются главные аспекты двухфазного автоматического повторного включения (ДАПВ) в транспонированных линиях СВН, оснащенных 4-лучевыми шунтирующими реакторами (ШР). В линиях напряжением 500-1150 кВ подавляющая доля отключений вызывается однофазными короткими замыканиями (ОКЗ), значительная часть которых, будучи неустойчивыми дуговыми авариями, успешно ликвидируется в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Однако заметную долю (порядка 5-10%) составляют двухфазные короткие замыкания (ДКЗ), для ликвидации которых обычно используется трехфазное быстродействующее АПВ (БАПВ). Представляет интерес проанализировать эффективность использования двухфазного АПВ для устранения двухфазных КЗ. Показано, что надлежащее представление реальной транспозиции линии необходимо для определения восстанавливающихся напряжений (ВН) и вторичных токов дуги (ВТД) в паузу ДАПВ. В линиях длиной порядка 500 км, оснащенных тремя ШР, предлагается способ снижения ВТД и ВН с использованием батарей конденсаторов, включаемых последовательно с ШР в паузу ДАПВ.

Ключевые слова: линии СВН, транспонированная линия, 4-лучевые ШР, ДАПВ, восстанавливающееся напряжение, вторичный ток дуги, бестоковая пауза.

Введение

Большое количество публикаций посвящено ликвидации наиболее вероятных однофазных коротких замыканий в цикле ОАПВ вместо трёхфазного АПВ (ТАПВ), что сопровождается минимальными возмущениями на примыкающие системы [1-5].

Заметным видом аварий в ВЛ СВН также являются двухфазные короткие замыкания, доля которых может достигать (5-10)% [6, 7]. При этом значительная часть ДКЗ представляет неустойчивые дуговые замыкания, которые могут быть успешно ликвидированы в цикле ТАПВ или ДАПВ.

Установление требуемой длительности бестоковой паузы для успешного осуществления ДАПВ является основной задачей, возникающей при применении ДАПВ. Требования к длительности бестоковой паузы ДАПВ обусловлены тем, что после отключения аварийных фаз с двух сторон дуга в месте ДКЗ продолжает гореть, получая подпитку от неотключенной фазы линии. Основной проблемой обеспечения надежного ДАПВ является сокращение времени горения дуги подпитки путем уменьшения тока подпитки и восстанавливающегося напряжения.

Преимущество ДАПВ по сравнению с ТАПВ состоит в том, что нет полного разрыва ВЛ, так как сохраняется передача мощности по неповрежденной фазе линии, что повышает динамическую устойчивость примыкающих систем.

Характер ДАПВ определяется характеристиками вторичной дуги в длинных промежутках, а также эффективностью методов для снижения вторичного тока дуги (ВТД) и после гашения вторичной дуги восстанавливающегося напряжения (ВН).

Главными параметрами, от которых зависит гашение вторичной дуги, являются: ВТД, протекающие в дуге до её гашения, $I_{ВТД}$; ВН, возникающее в месте вторичной дуги после её гашения, $U_{ВН}$.

По данным [8] среднее время гашения дуги и, соответственно, успешной паузы ОАПВ зависит от установившегося тока ВТД. Эта зависимость, представленная в графическом виде, с достаточной точностью может быть аппроксимирована в аналитической форме и ис-пользована при оценке успешности ДАПВ:

$$t_{ДАПВ}\left(I_{д}\right) = 0,5 - 1,67\cdot 10^{-3} I_{д} + 2,78\cdot 10^{-4} I_{д}^{2}, \quad (1)$$

где $I_{д}$ – ток дуги.

Как правило, длинные линии имеют транспозицию. При расчете ВТД и ВН такие линии зачастую представляются как идеально транспонированные, имеющие равные собственные и взаимные продольные и поперечные элементы для всех фаз. Однако, как показано в [9], транспозиция линий должна учитываться.

В следующем разделе описывается методика, использующая теорию 8-полюсников, для надлежащего учета транспозиции линий.

Анализ в данной статье выполняется для ВЛ 500 кВ традиционной конструкции с горизонтальным расположением фаз с однократным циклом транспозиции, как показано на **рис. 1.**

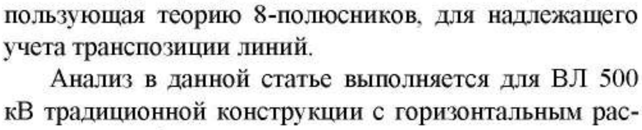


Рис. 1. Однократный цикл транспозиции

Алгоритм расчета ВТД и ВН в линиях с реальной транспозицией

Наиболее универсальным методом расчета является матричный метод, в котором линия и другие элементы электропередачи представляются в фазных координатах. Для получения общей картины достаточно оценить ВТД в узловых точках 1п, 2л, где имеют место наибольшие ВТД. На **рис. 2** представлена схема для расчета ВТД в узле 1п в виде каскадного соединения отдельных участков, каждый из которых замещается соответствующим 8-полюсником.

Полная фазная матрица дальней ЭП формируется согласно **рис. 2:**

$$\mathbf{M}_{12} = \mathbf{M}_{\text{В}}\mathbf{M}_{\text{Д}}\mathbf{M}_{\text{ШР1}}\mathbf{M}_{\text{ВЛ}}\mathbf{M}_{\text{ШР2}}\mathbf{M}_{\text{В}}. \qquad (2)$$

Соответствующие компоненты (2) определяются следующим образом.

На **рис. 3** показана схема моделирования коммутационного состояния выключателя. При $R_v = 0$ фаза v включена. При $R_v \to \infty$ моделируется разомкнутое состояние. При этом достаточно принять $R_v = 10^6$ Ом.

Полная матрица состояния выключателя запишется следующим образом:

$$\mathbf{M}_{\text{в}} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{R}_{\text{в}} \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}; \qquad (3)$$

$$\mathbf{R}_{\text{в}} = \begin{vmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{1}_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где $\mathbf{R}_{\text{в}}$ – матрица состояния выключателя; $\mathbf{1}_3$ – единичная матрица 3-го порядка. Например, при

$$\boldsymbol{R}_{\text{в}} = \begin{vmatrix} 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

фазы «*a*» и «*b*» отключены, а фаза «*c*» включена.

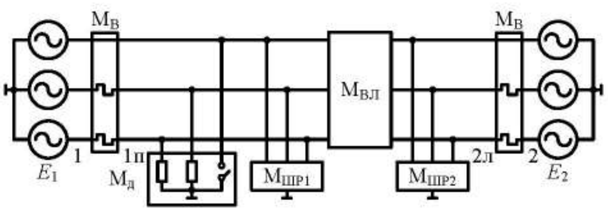


Рис. 2. Трехфазная схема для расчета ВТД и ВН

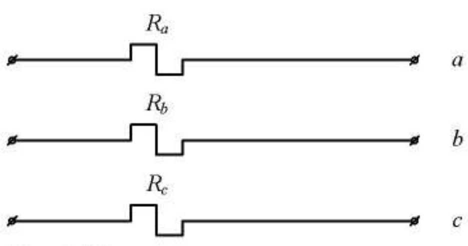


Рис. 3. Моделирование коммутационного состояния выключателя

В статье рассматриваются два случая:

– межфазовое КЗ, которое вполне вероятно при пляске проводов;

– межфазовое КЗ на землю. (Например, в грозовой период при ударе молнии в провод возможно сближение фаз в результате пляски проводов, что может привести к одновременному перекрытию как на опору, так и на другую фазу. Хотя такое повреждение маловероятно, но не исключено).

Исходя из этого, матрица дуги описывается в зависимости от вида замыкания.

Полная фазная матрица дуги имеет вид

$$\mathbf{M}_{\text{д}} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{G}_{\text{д}} & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}; \qquad (4)$$

где $\mathbf{G}_{\text{д}}$ матрица дуги при её горении меду фазами «*a*» и «*b*»

$$\mathbf{G}_{\text{д}} = \begin{vmatrix} \dfrac{1}{R_{ab}} & -\dfrac{1}{R_{ab}} & 0 \\ -\dfrac{1}{R_{ab}} & \dfrac{1}{R_{ab}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

или при её горении меду фазами «*a*» и «*b*», а также между фазой «а» и землёй

$$\mathbf{G}_{\text{д}} = \begin{vmatrix} \dfrac{1}{R_{a\text{з}}} + \dfrac{1}{R_{ab}} & -\dfrac{1}{R_{ab}} & 0 \\ -\dfrac{1}{R_{ab}} & \dfrac{1}{R_{ab}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

R_{ab} – сопротивление дуги меду фазами «*a*» и «*b*»; $R_{a\text{з}}$ – сопротивление дуги между фазой «а» и землёй.

ВТД зависит от сопротивления вторичной дуги, которое является нелинейной функцией ВТД. Принимая во внимание модель дуги, представленную в [10], сопротивление дуги можно аппроксимировать следующим выражением:

$$R_{\text{д}} = \frac{A}{I_{\text{д}}^{\alpha}}, \qquad (5)$$

где $\alpha = 1{,}4$, $A \approx 3{,}5 \cdot 10^5$ для ВЛ 500 кВ.

При оценке успешности ДАПВ возникает вопрос, каким сопротивлением следует учитывать дугу. После отключения аварийных фаз ток дуги затухает за 4-5 периодов, и сопротивление вторичной дуги находится в диапазоне 500-2000 Ом. Что касается входного сопротивления схемы относительно места повреждения, то оно при отключенных аварийных фазах с двух сторон на порядок превышает сопротивление дуги, т.е. сопротивление дуги не оказывает заметное влияние на ВТД и при дальнейших расчетах принимается равным 500 Ом.

Полная матрица шунтирующего реактора, включая нулевой реактор в его нейтрали, имеет вид:

$$\mathbf{M}_{\text{шр}} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{Y}_{\text{шрф}} & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}, \tag{6}$$

где $\mathbf{Y}_{\text{шрф}} = \mathbf{Z}_{\text{шрф}}^{-1}$,

$$\mathbf{Z}_{\text{шрф}} = \begin{vmatrix} Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} \\ jX_{\text{н}} & Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} \\ jX_{\text{н}} & jX_{\text{н}} & Z_{\text{шр}} + jX_{\text{н}} \end{vmatrix},$$

$Z_{\text{шр}}$ – фазное сопротивление собственно шунтирующего реактора; $X_{\text{н}}$ –сопротивление нулевого реактора.

Транспонированная линия, моделируемая в фазных координатах, представлена на **рис. 4** в виде каскадно соединенных 8-полюсников.

Фазная матрица транспонированной ВЛ определится как

$$\mathbf{M}_{\text{ВЛ}} = \mathbf{M}_{\text{т}}\mathbf{M}_{\text{ш}}\mathbf{M}_{\text{т}}\mathbf{M}_{\text{ш}}\mathbf{M}_{\text{т}}\mathbf{M}_{\text{ш}}. \tag{7}$$

Полная матрица транспозиции

$$\mathbf{M}_{\text{Т}} = \begin{vmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{T} \end{vmatrix}; \tag{8}$$

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{0}_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

где **T** – матрица транспозиции; $\mathbf{0}_3$ – нулевая матрица 3-го порядка.

Полная матрица линии на шаге транспозиции имеет вид

$$\mathbf{M}_{\text{ш}} = \begin{vmatrix} \mathbf{A}_{\text{ш}} & \mathbf{B}_{\text{ш}} \\ \mathbf{C}_{\text{ш}} & \mathbf{D}_{\text{ш}} \end{vmatrix}, \tag{9}$$

где $\mathbf{A}_{\text{ш}}$, $\mathbf{B}_{\text{ш}}$, $\mathbf{C}_{\text{ш}}$, $\mathbf{D}_{\text{ш}}$ – матричные фазные коэффициенты на шаге транспозиции

$$\mathbf{A}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} A_{\text{ш}a} & A_{\text{ш}ab} & A_{\text{ш}ac} \\ A_{\text{ш}ba} & A_{\text{ш}b} & A_{\text{ш}bc} \\ A_{\text{ш}ca} & A_{\text{ш}cb} & A_{\text{ш}c} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} B_{\text{ш}a} & B_{\text{ш}ab} & B_{\text{ш}ac} \\ B_{\text{ш}ba} & B_{\text{ш}b} & B_{\text{ш}bc} \\ B_{\text{ш}ca} & B_{\text{ш}cb} & B_{\text{ш}c} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} C_{\text{ш}a} & C_{\text{ш}ab} & C_{\text{ш}ac} \\ C_{\text{ш}ba} & C_{\text{ш}b} & C_{\text{ш}bc} \\ C_{\text{ш}ca} & C_{\text{ш}cb} & C_{\text{ш}c} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_{\text{ш}} = \begin{bmatrix} D_{\text{ш}a} & D_{\text{ш}ab} & D_{\text{ш}ac} \\ D_{\text{ш}ba} & D_{\text{ш}b} & D_{\text{ш}bc} \\ D_{\text{ш}ca} & D_{\text{ш}cb} & D_{\text{ш}c} \end{bmatrix}.$$

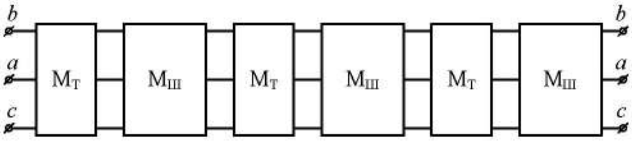


Рис. 4. Моделирование транспонированной линии

Алгоритм для определения ВТД строится следующим образом. Сначала определяется полная фазная матрица всей схемы 1-2 согласно (2) и матрицы участков 1п-2, 2л-2:

$$\begin{aligned} &\mathbf{M}_{\mathbf{1п2}} = \mathbf{M}_{\text{д}}\mathbf{M}_{\text{ШР1}}\mathbf{M}_{\text{ВЛ}}\mathbf{M}_{\text{ШР2}}\mathbf{M}_{\text{В}}; \\ &\mathbf{M}_{\mathbf{2л2}} = \mathbf{M}_{\text{В}}. \end{aligned} \tag{10}$$

Далее определяются соответствующие подматрицы этих полных матриц:

$$\begin{aligned} &\mathbf{A}_{\mathbf{12}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{\mathbf{12}}, 0, 2, 0, 2\right), \\ &\mathbf{B}_{\mathbf{12}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{\mathbf{12}}, 0, 2, 3, 5\right); \\ &\mathbf{A}_{\mathbf{1п2}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{i2}, 0, 2, 0, 2\right), \\ &\mathbf{B}_{\mathbf{1п2}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{i2}, 0, 2, 3, 5\right); \\ &\mathbf{A}_{\mathbf{2л2}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{\mathbf{2л2}}, 0, 2, 0, 2\right), \\ &\mathbf{B}_{\mathbf{2л2}} = \text{submatrix}\left(\mathbf{M}_{\mathbf{2л2}}, 0, 2, 3, 5\right). \end{aligned} \tag{11}$$

Определяем вектор-столбец фазных токов в конце схемы:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{2ф}} = \mathbf{B}_{\mathbf{12}}^{-1}(\mathbf{U}_{\mathbf{1ф}} - \mathbf{A}_{\mathbf{12}}\mathbf{U}_{\mathbf{2ф}}), \tag{12}$$

$$\mathbf{U}_{\mathbf{1ф}} = \frac{525}{\sqrt{3}} e^{i\delta} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix}, \ \mathbf{U}_{\mathbf{2ф}} = \frac{500}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix},$$

где $\mathbf{U}_{\mathbf{1ф}}$, $\mathbf{U}_{\mathbf{1ф}}$ – вектор-столбцы заданных напряжений в узлах 1 и 2; $a = e^{i2\pi/3}$.

Находим вектор-столбцы фазных напряжений в узлах 1п и 2л в месте горения дуги:

$$\begin{aligned} &\mathbf{U}_{\mathbf{1пф}} = \mathbf{A}_{\mathbf{1п2}}\mathbf{U}_{\mathbf{2ф}} + \mathbf{B}_{\mathbf{1п2}}\mathbf{I}_{\mathbf{2ф}}; \\ &\mathbf{U}_{\mathbf{2лф}} = \mathbf{A}_{\mathbf{2л2}}\mathbf{U}_{\mathbf{2ф}} + \mathbf{B}_{\mathbf{2л2}}\mathbf{I}_{\mathbf{2ф}}. \end{aligned} \tag{13}$$

Далее определяем напряжения аварийных фаз в местах возможного горения вторичной дуги $U_{1\text{пад}}$, $U_{1\text{пbд}}$, $U_{2\text{лад}}$, $U_{2\text{лbд}}$ и соответственно амплитуды вторичного тока дуги:

$$\begin{aligned} &I_{1\text{пад}} = \sqrt{2}\frac{U_{1\text{пад}}}{R_{\text{д}}}; \\ &I_{2\text{лад}} = \sqrt{2}\frac{U_{2\text{лад}}}{R_{\text{д}}}; \\ &I_{1\text{п}ab\text{д}} = \sqrt{2}\frac{U_{1\text{пад}} - U_{1\text{пbд}}}{R_{\text{д}}}; \\ &I_{2\text{л}ab\text{д}} = \sqrt{2}\frac{U_{2\text{лад}} - U_{2\text{лbд}}}{R_{\text{д}}}. \end{aligned} \tag{14}$$

Полагая, что в (4) $R_д \to \infty$ (практически достаточно принять $R_д = 10^6$ Ом), найдем из (13) ВН на аварийной фазе после гашения вторичной дуги.

Анализ ВТД и ВН при реальной транспозиции ВЛ

Основываясь на предложенном алгоритме, проанализируем условия гашения вторичной дуги для ВЛ 500 кВ при её длинах 300 и 500 км. Реактивная мощность ШР составляет 180 Мвар.

Необходимое условие, при котором гарантируется успешное ОАПВ в диапазоне паузы 0,5–1,0 с:

$$I_{втд} \le 10 - 45 A_{ампл}. \tag{15}$$

Второе обстоятельство, которое должно приниматься в расчет, – это создание приемлемых условий работы для защитных аппаратов ОПН в паузу ОАПВ (**рис. 5**).

После гашения дуги возникают биения на отключенных фазах, обусловленные взаимодействием емкостных и индуктивных элементов электропередачи. Как показано в [5], для ВЛ 500 кВ допустимая величина вынужденной составляющей ВН оценивается величиной $U_{вн.доп} = 230$ кВ, и, соответственно, должно выполняться условие

$$U_{вн} \le U_{вн.доп}. \tag{16}$$

Основным средством для снижения ВТД является включение нулевых реакторов в нейтрали ШР.

А. ВЛ 500 кВ, 300 км

Линии такой длины имеют по одному ШР на её концах. На **рис. 6** представлены зависимости межфазных ВТД от сопротивления нулевого реактора, при оптимальной величине которого 170 Ом ток дуги приближается к нулю. Что касается ВТД с фазы «*а*» на землю, то даже при предельных углах он составляет около 10 А, и, соответственно, бестоковая пауза удовлетворяет условию (15).

На **рис. 7** показана зависимость ВН на приемном конце аварийных фаз в зависимости от сопротивления нулевого реактора.

Как видно из этого рисунка, необходимые условия (16) относительно ВН выполняются, если при ДАПВ сопротивление нулевого реактора равно 170 Ом. Подобная картина относительно ВТД и ВН имеет место в случае аварии на отправном конце линии.

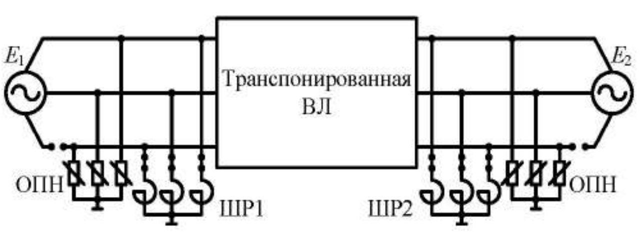


Рис. 5. ОАПВ в транспонированной линии, оборудованной ОПН

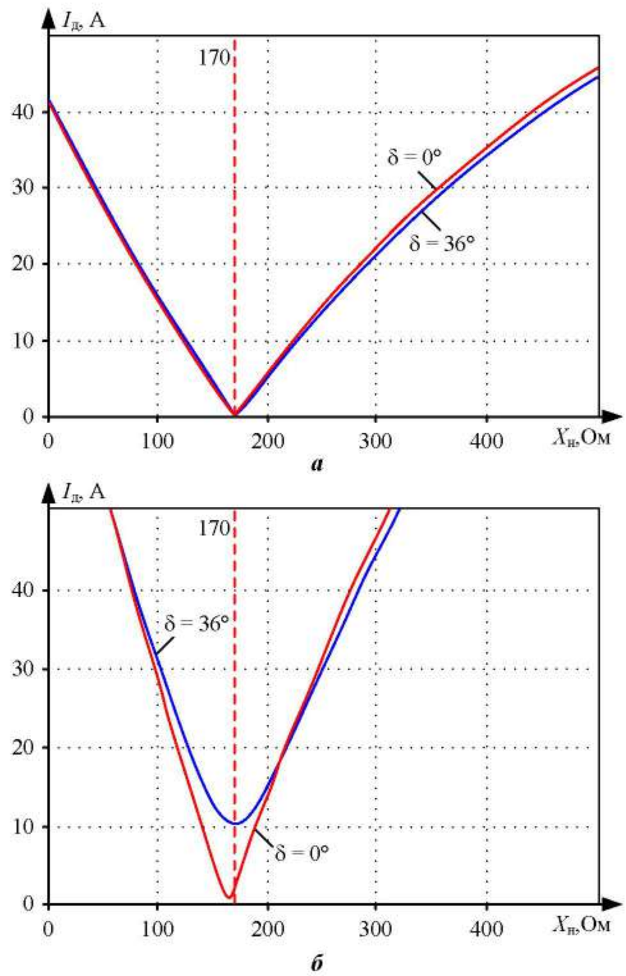


Рис. 6. Зависимость ВТД при аварии в конце линии от сопротивления нулевого реактора:
а **– межфазные ВТД;** ***б*** **– ВТД с фазы «*а*» на землю**

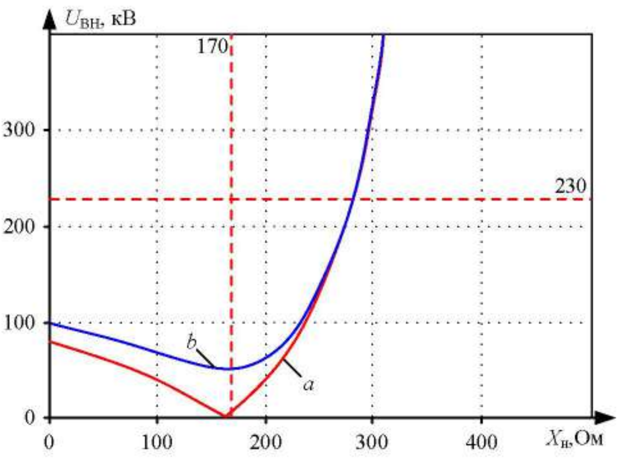


Рис. 7. Зависимость ВН при аварии в конце линии от сопротивления нулевого реактора

Б. ВЛ 500 кВ, 500 км

Линии такой длины обычно оснащаются тремя ШР. В нашем примере два ШР расположены на отправном конце линии и один ШР – на приемном конце.

На **рис. 8** показана зависимость ВТД на приемном конце линии от сопротивления нулевого реактора, из которого видно, что ВТД удовлетворяет условию (15).

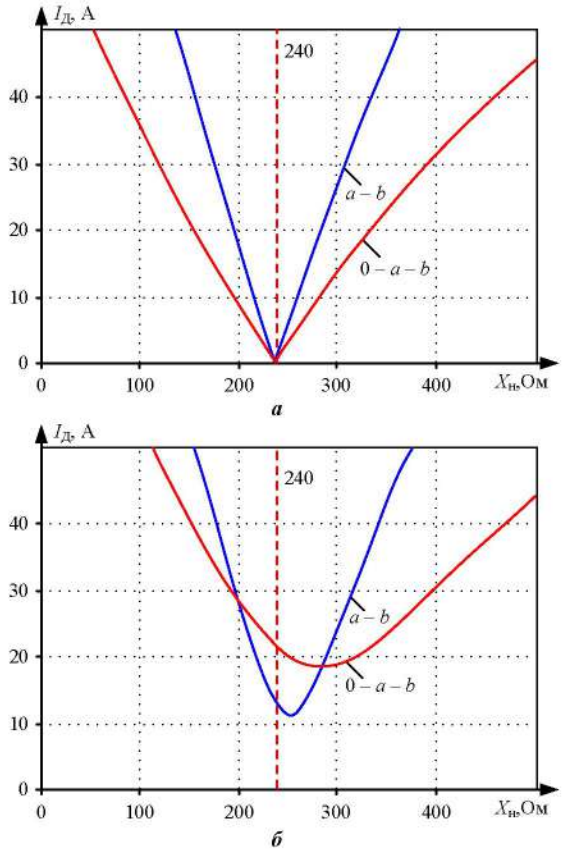


Рис. 8. Зависимость ВТД при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора: *а* – δ=0°; *б* – δ=60°

Однако, как показывает **рис. 9**, ВН значительно превышают допустимый уровень, поскольку схема отличается резонансным характером.

Избавиться от резонанса возможно подключением во время ДАПВ только по одному ШР на концах линии или по два ШР на каждом конце линии. Однако в этом случае ВТД при углах 1 достигают 60 А и не будут удовлетворять условию (15).

Эффективный способ снижения ВТД, идея которого была высказана в [9], состоит в установке в аварийных фазах шунтирующих емкостей, которые зашунтированы во время нормальных режимов работы (**рис. 10**). Порядок работы устройства следующий: при возникновении ДКЗ линейные выключатели отключают аварийные фазы, потом включаются нейтральные реакторы и вводятся в работу соответствующие емкости.

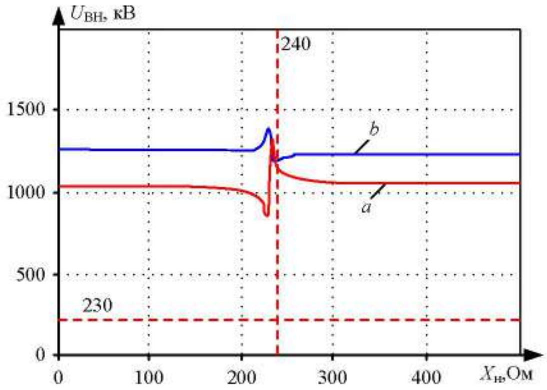


Рис. 9. Зависимость ВН при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора

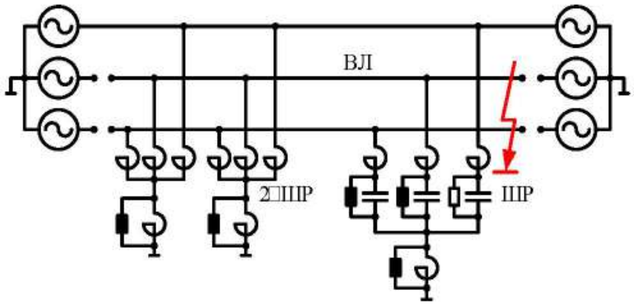


Рис. 10. Способ для обеспечения успешного ДАПВ

Для исключения резонанса и необходимого снижения ВТД сопротивление батареи конденсаторов должно находиться в диапазоне 15–20% от сопротивления ШР. Мощность батареи конденсаторов сравнительно мала и не превышает 10% от мощности ШР. На **рис. 11** иллюстрируется эффективность предложенного способа.

При сопротивлении батареи конденсаторов, составляющем 15% от сопротивления ШР, и сопротивлениях нулевого реактора 240 Ом на отправном конце и 120 Ом на приемном конце ВДТ не превышает 22 А, а ВН не попадает в резонансную зону.

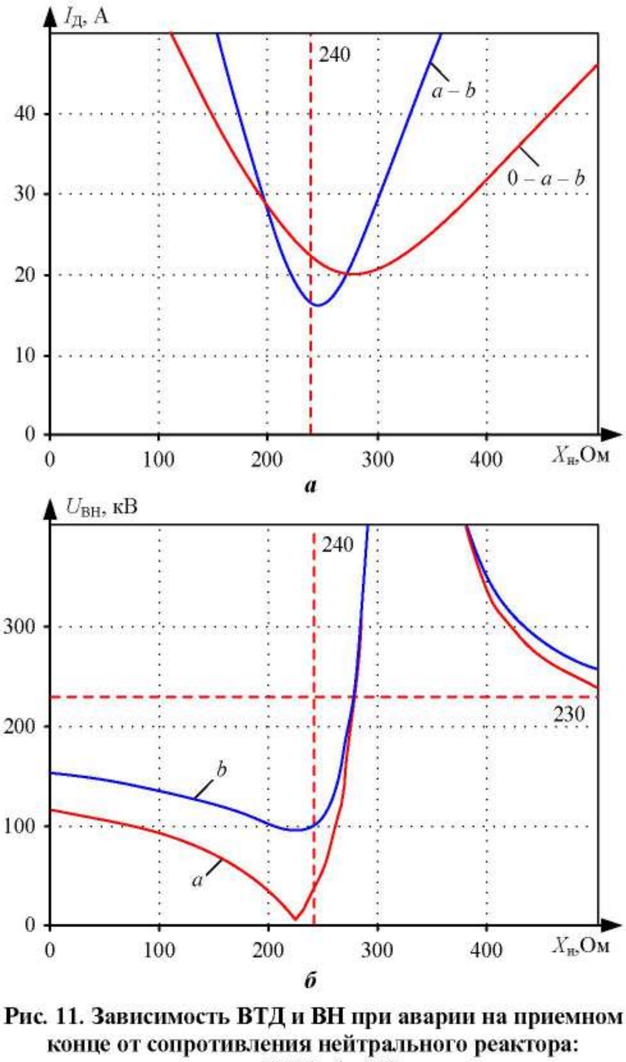


Рис. 11. Зависимость ВТД и ВН при аварии на приемном конце от сопротивления нейтрального реактора: *а* – ВДТ; *б* – ВН

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предлагается метод для анализа ДАПВ в транспонированных линиях СВН, оборудованных 4-лучевыми шунтирующими реакторами. Предлагаемый алгоритм позволяет рассчитывать восстанавливающиеся напряжения (ВН) и вторичные токи дуги (ВТД) по концам аварийных фаз, принимая в расчет реальную транспозицию линии с горизонтальным расположением фаз.

С использованием этого метода анализируются линии 500 кВ длиной 300 и 500 км. В линиях длиной порядка 300 км, оснащенных двумя реакторами, ВДТ и ВН находятся в допустимых пределах с возможностью иметь длительность паузы ДАПВ не более 0,6 с. Для линий длиной порядка 500 км, оснащенных тремя реакторами, успешное ДАПВ невозможно из-за возникновения резонансных ВН в схеме. В статье предлагается использование батарей конденсаторов, подключаемых последовательно в фазах ШР для осуществления успешного ДАПВ при длительности необходимой паузы порядка 0,6 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kimbark W. Supression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors // IEEE Transaction on Power Apparatus and System. March-April 1964. Vo1. 83. Pp. 285-290.
2. Красильникова Т.Г., Джононаев С.Г. Способы ликвидации однофазных коротких замыканий в воздушных линиях сверхвысокого напряжения // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2(84). С. 116-130.
3. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений / под ред. М.Л. Левинштейна. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
4. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / под ред. Г.Н. Александрова. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние 1993. 560 с.
5. Красильникова Т.Г., Манусов В.З. Анализ токов дуги подпитки в паузу ОАПВ в процессе динамического перехода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. №1. С. 313-316.
6. Зеличенко А.С., Смирнов Б.И. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения. М.: Энергоиздат, 1981. 336 с.
7. Барг И.Г., Эдельман В.И. Воздушные линии электропередачи: вопросы эксплуатации и надежности. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
8. Рашкес В.С. Обобщение эксплуатационных данных эффективности ОАПВ ВЛ СВН и опытных данных времени гашения дуги подпитки // Электрические станции. 1989. №3. С. 65-72.
9. Krasilnikova T., Samorodov G. Analysis method for transient single-phase fault removal on EHV transposed transmission lines // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings, Novosibirsk, 2018, vol. 1, part 5, pp. 173-178.
10. Goldberg S., Norton W.F., Tziovaras D. A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 4, no. 1, January 1989.

Поступила в редакцию 13 октябрь 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF ELIMINATION OF UNSTABLE TWO-PHASE SHORT CIRCUITS IN TRANSPOSED EXTRA-HIGH VOLTAGE LINES IN A TWO-PHASE AUTOMATIC RECLOSING

Tatyana G. Krasilnikova

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: tatka552005@yandex.ru

Karomatullo A. Makhmudov

Assistant Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: mahmudovkaromat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2127-3772.

Murodbek Kh. Safaraliev

Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: murodbek_03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3433-9742.

The paper is concerned with the main aspects of the two-phase automatic reclosing in transposed extra-high voltage lines equipped with four-radial shunt reactors. In 500-1150 kV lines, the overwhelming proportion of blackouts is caused by single-phase short circuits, many of which, being unstable arc accidents are conveniently eliminated in a single-phase automatic reclosing cycle. However, a considerable share (approximately 5–10%) is made up of double-phase short-circuits, for the elimination of these, a high-speed three-phase automatic reclosing is usually used. It is of great interest to analyze the efficiency of using double-phase automatic reclosing to eliminate double-phase short circuits. It was shown that complying presentation of the real transpose line is necessary to determine the transient recovery voltage and secondary arc current at two-phase automatic reclosing pause. In 500 km lines with equipped with three shunt reactors, a method was proposed to decrease the secondary arc current and transient recovery voltage using capacitor batteries, which are connected in series with the shunt reactor during the two-phase automatic reclosing pause.

Keywords: extra-high voltage line, transposed line, four-radial shunt reactors, two-phase automatic reclosing, transient recovery voltage, secondary arc current, dead time.

REFERENCES

1. Kimbark W. Supression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, March-April 1964, vo1. 83, pp. 285-290.
2. Krasilnikova T.G., Jononaev S.G. The methods of liquidation of a single-phase short circuit in the overhead lines of

extra-high voltage. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific papers of the Novosibirsk state technical university]. 2016, no. 2 (84), pp. 116-130. (In Russian)

3. Levinshtein M.L. *Protsessy pri odnofaznom avtomaticheskom povtornom vklyuchenii linii vysokikh napryazhenii* [The processes of high voltage lines at single-phase automatic reclosing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 256 p. (In Russian)
4. Aleksandrov G.N. *Proektirovanie linii elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [The design of superhigh voltage transmission lines]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1993. 560 p. (In Russian)
5. Krasilnikova T.G., Manusov V.Z. The analysis of inflow arc currents in the pause of a single-phase automatic reclosing in the process of dynamic transition. *Nauchnye problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* [Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East]. 2009, no. 1, pp. 313-316. (In Russian)
6. Zelichenko A.S., Smirnov B.I. *Proektirovanie mekhanicheskoi chaste vozdushnykh linii sverkhvysokogo napryazheniya* [Planning of mechanical part of overhead lines of extra high voltage]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 336 p. (In Russian)
7. Barg I.G., Edelman V.I. *Vozdushnye linii elektroperedachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [Overhead transmission lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 248 p. (In Russian)
8. Rashkes V.S. Generalisation of operational data of efficiency SPAR on EHV lines and experimental data of time of secondary arc extinction. *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. 1989, no. 3, pp. 65-72. (In Russian).
9. Krasilnikova T., Samorodov G. Analysis method for transient single-phase fault removal on EHV transposed transmission lines // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) Proceedings, Novosibirsk, 2018, vol. 1, part 5, pp. 173-178.
10. Goldberg S., Norton W.F., Tziovaras D. A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 4, no. 1, January 1989.

Красильникова Т.Г., Махмудов К.А., Сафаралиев М.Х. Анализ ликвидации неустойчивых двухфазных коротких замыканий в транспонированных линиях СВН в цикле двухфазного автоматического повторного включения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 4-10. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-4-10

Krasilnikova T.G., Makhmudov K.A., Safaraliev M.Kh. Analysis of Elimination of Unstable Two-Phase Short Circuits in Transposed Extra-High Voltage Lines in a Two-Phase Automatic Reclosing. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 4-10. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-4-10

УДК 621.31 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16

Варганова А.В.[1], Джагаров Н.Ф.[2]

[1]Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
[2]Высшее военно-морское училище имени Николы Вапцарова, г. Варна, Болгария

Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций

Работа посвящена одному из способов повышения эффективности управления промышленными электростанциями с применением программного продукта расчета и оптимизации их режимов. Как правило, решение задач оптимизации носит детерминированный характер, решаются частные задачи управления или повышения эффективности функционирования конкретного агрегата, участка. Авторами работы предлагается комплексный подход по поиску оптимальных режимов работы генерирующей электроустановки с целью их прогнозирования и определения наилучших вариантов для заданного времени эксплуатации. Подход ориентирован на одновременный поиск оптимальных режимов работы генераторов и котлоагрегатов, а также состава топливной смеси при условии минимума затрат на свежий пар, идущий на производственные и теплофикационные отборы, а также выработку электроэнергии. При разработке алгоритма учтены отличительные особенности схем электростанций, возможность применения нескольких видов топлива, сезонность работы, а также остаточный ресурс оборудования. Алгоритм расчета основан на методе динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования и реализован в модулях программного продукта КАТРАН. Исходными данными для расчета являются технико-экономические модели энергооборудования, заданные в табличной форме и отражающие эксплуатационные ограничения. Результаты работы предназначены для служб планирования режимов работы промышленных систем электроснабжения, а также для технических отделов электростанций. В работе приведен пример расчета в условиях действующей системы электроснабжения промышленного предприятия, рассчитаны оптимальные режимные карты котлов и диаграммы мощностей генераторов, а также спрогнозированы возможные послеаварийные режимы работы теплоэнергетического оборудования и их эффективные загрузки в данных условиях.

Ключевые слова: тепловая электростанция, турбогенератор, энергетический котел, промышленный энергоузел, собственная генерация, вторичные энергоресурсы, оптимизация, энергоэффективность, динамическое программирование.

Введение

Исследования в области повышения эффективности функционирования объектов электроэнергетики связаны с необходимостью сокращения затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии.

Разработано и внедрено большое число подходов, направленных на выполнение мероприятий по энерго- и ресурсосбережению в области электроэнергетики [1].

Часть работ решает технические задачи в условиях систем электроснабжения, другая направлена на применение математического аппарата теории оптимизации с целью разработки алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего улучшить показатели работы промышленных систем электроснабжения.

В работах [2, 3] приведено одно из возможных технических решений, позволяющих сократить потери мощности в распределительных сетях за счет установки мощных компенсирующих устройств. Ту же задачу авторы статьи [4] ставят в условиях энергоузлов с ветроэлектростанциями. Определение экономически и технически целесообразных режимов систем электроснабжения достигается также за счет определения оптимального уровня напряжения в сетях [5].

Большое число задач решается уже на электростанциях [6] при производстве электроэнергии и тепла, учитывая при этом особенности режимов работы распределительных сетей энергоузла [7] и экологические факторы [8].

Ряд работ посвящен моделированию электростанций, с целью поиска наилучших режимов, мониторинга параметров работы установок. Авторами работы [9] предлагается применять сочетание подхода нейронных сетей и вейвлет-моделей с целью разработки модели электростанции, что обеспечит построение высокопроизводительной системы по мониторингу и контролю параметров режимов электростанции. При разработке моделей электростанций должны обязательно соблюдаться ограничения по их допустимым режимам [10, 11].

В [12, 13] разработаны топливные модели электростанций, позволяющие осуществлять определение запасов топлива и их потребления с использованием специализированного программного обеспечения.

При разработке систем управления и мониторинга на электростанциях обязательно должен быть применен принцип избыточности [14] с целью обеспечения надежной работы электроустановки. Отельные задачи решаются при эксплуатации котельных установок [15], генераторов [16] или при решении комплексной задачи оптимизации при комбинированном производстве тепла и электроэнергии [17, 18].

Решение оптимизационных задач в условиях промышлен.ных тепловых электростанций имеет большое число путей и должно быть адаптировано к характерным условиям промышленного энергоузла. Универсального подхода для повышения эффективности функционирования электростанций нет, принимать их нужно только для конкретного объекта и это обусловливает большое число методов, методик, алгоритмов по решению данной задачи.

В данной работе предлагается осуществлять оптимизацию режимов работы заводских электростанций за счет применения метода комплексной оптимизации режимов котлоагрегатов и турбогенераторов.

Комплексная методика оценки экономически целесообразных режимов работы промышленных электростанций

Проведение комплексной оптимизации режимов работы заводской ТЭЦ включает в себя одновременный поиск оптимальной загрузки генераторов, котлоагрегатов и расходов первичных энергоносителей электростанции при условии соблюдения допустимых эксплуатационных режимов.

Предлагаемый алгоритм основан на сочетании метода последовательного эквивалентирования динамического программирования [19].

Общий вид целевой функции комплексной оптимизации имеет вид:

$$\begin{cases} З_n = \sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{k=1}^{m}\left(С_{k,j}(y_j) + С_{\text{от}\,k,j}\left(y_j\right)\right)\right) \to \min, \\ D_{\Sigma} = P_{\text{ЭС}} \cdot d_{\text{ЭЭ}} + D_{\text{Т}} + D_{\text{П}}, \\ P_{\text{ЭС}} = \sum_{k=1}^{l} P_k\left(D_k\right), \\ B_{\Sigma} = \sum_{k=1}^{m} B_k\left(D_m\right), \end{cases} \quad (1)$$

где y_j – оптимальное управление на j-м шаге; $С_{k,j}(y_j)$ – стоимость расхода энергоносителя, идущего на выработку пара, необходимого для выработки мощности при суммарной загрузке источников $P_{\text{Г}}$; $P_{\text{Г}}$ – суммарная мощность турбогенераторов, получающих пар от одного паропровода; $С_{\text{от}\,k,j}(y_j)$ – стоимость расхода пара через отборы; n – число котлов на электростанции, подключенных к одному паропроводу; m – общее число различных видов первичных энергоносителей, используемых на рассматриваемой электростанции; $P_{\text{ЭС}}$ – суммарная выработка активной мощности генераторами электростанции, МВт; $d_{\text{ЭЭ}}$ – удельный расход пара на выработку 1 МВт·ч электроэнергии, т/МВт·ч; $D_{\text{Т}}$, $D_{\text{П}}$ – теплофикационный и производственный отбор, т/ч; B_{Σ} – суммарный расход энергоносителей, т у.т.

На целевую функцию накладываются эксплуатационные ограничения по допустимым величинам паропроизводительности, температуре перегретого пара, давления в топке котлоагрегата, мощности на клеммах генератора. Кроме того, обязательно осуществляются проверки параметров электрического режима на допустимые потери напряжения и токов, протекающих через элементы схемы.

Блок-схема алгоритма разработки приведена на **рис. 1**. Исходными данными для расчета являются технико-экономические модели котлов и генераторов, представляющие собой зависимости паропроизводительности (для котлов) и мощности (для турбогенераторов) от расхода энергоносителя (для котлов – энергетическое топливо, для турбогенераторов – свежий пар) и себестоимости единицы свежего пара [20].

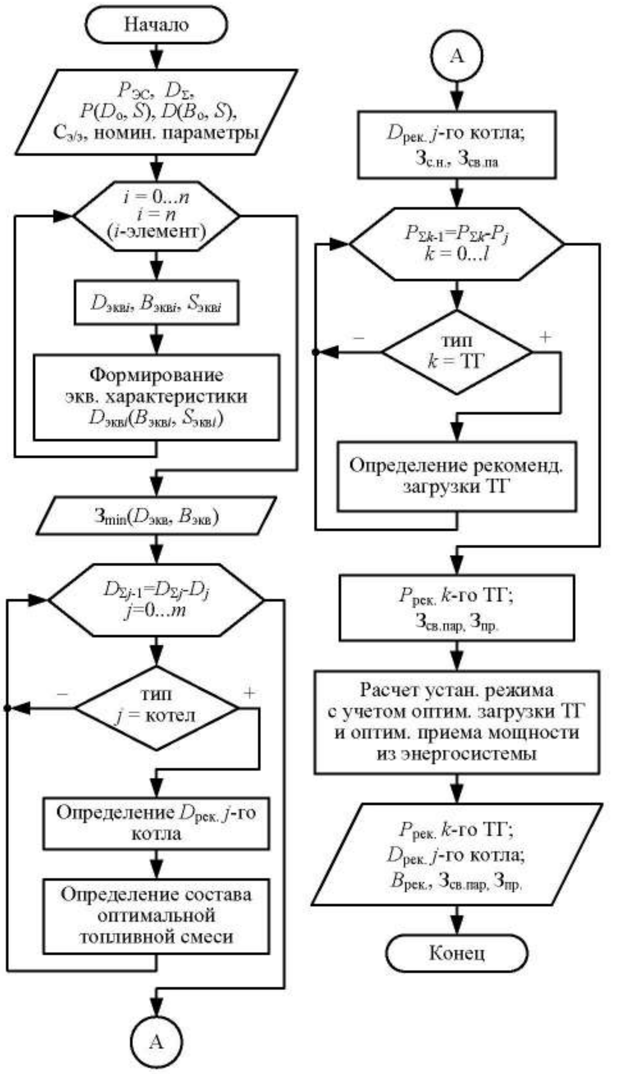


Рис. 1. Блок-схема алгоритма комплексной оптимизации режимов работы заводских электростанций

Отличительной особенностью предложенного подхода является одновременный учет параметров тепловых и электрических режимов при поиске оптимального режима генерирующей установки.

Разработанные алгоритмы реализованы в оригинальном программном продукте КАТРАН [21, 22]. Структурная схема ПВК приведена на **рис. 2**.

Модуль оптимизации состоит из двух структурных элементов:

– оптимизация по активной мощности – осуществляет определение оптимальной активной мощности генераторов;

– оптимизация по тепловой нагрузке – расчет оптимальной загрузки котлов и определения экономически целесообразного состава топливной смеси для топок котлов;

– выдача рекомендаций по работе электростанций – определение комплексного решения по загрузке генераторов и котлов электростанции при возможной выработке мощности электроустановки, расчет показателей эффективности электростанции (суммарные затраты на генерацию, затраты на топливо единичного котлоагрегата, себестоимость тонны свежего пара).

Вывод данных осуществляется в MS Excel, что обеспечивает дальнейшую необходимую обработку результатов оптимизационного расчета.

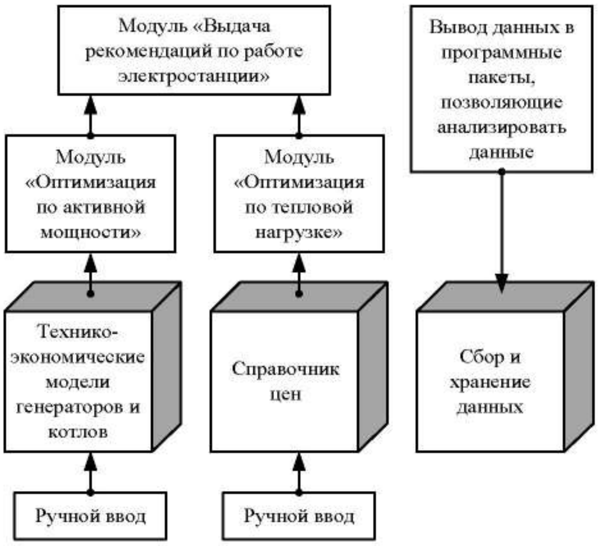


Рис. 2. Структурная схема модуля «Оптимизация» ПВК КАТРАН

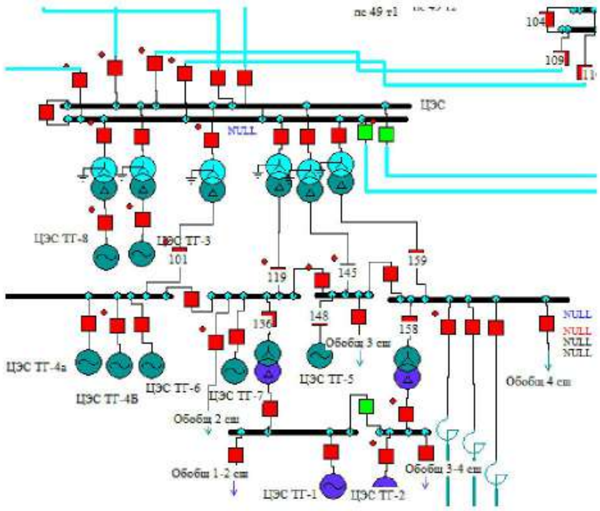


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема промышленной электростанции (фрагмент схемы исследуемого энергоузла)

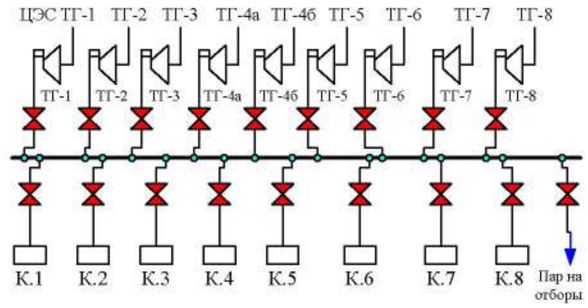


Рис. 4. Упрощенная тепловая схема промышленной электростанции

Практическая часть исследования

Расчеты проводились в условиях действующей системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями.

На **рис. 3** приведена упрощенная электрическая схема, на **рис. 4** тепловая схема рассматриваемой электростанции, созданная в оригинальном программном продукте КАТРАН [21, 22].

Котлы электростанции работают на смеси доменного и природного газов.

В результате оптимизационных расчетов получены оптимальные загрузки котлоагрегатов (**табл. 1**) и турбогенераторов (**табл. 2**) промышленных электростанций в нормальных, ремонтных и/или послеаварийных режимах работы, а также определен оптимальный состав топливной смеси в зависимости от суммарной выработки активной мощности электростанцией.

На основании полученных значений можно прогнозировать затраты на выработку тепла и электроэнергии для возможных суммарных выработок электростанций в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах (**рис. 5**).

Таблица 1

Фрагмент эквивалентной режимной карты котла рассматриваемой тепловой промышленной электростанции

Суммарная выработка по ЭС, МВт	Параметр	Станционный номер котла							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Нормальная схема									
173	D, т/ч	90	170	170	150	90	210	121	171
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	5,6	8	9,8	0,6	6,1	12,3	2,5	11
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	85	100	80	100	36	60	90	85
174	D, т/ч	90	170	170	150	90	210	121	176
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	5,6	8	9,8	0,6	6,1	12,3	2,5	11
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	85	100	80	100	36	60	90	85
…									
213	D, т/ч	160	170	162	150	150	210	190	170
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	8,4	8	9,8	0,6	9,6	12,3	12	9,5
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	90	100	80	100	38	60	90	55
214	D, т/ч	160	170	170	150	150	210	190	188
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	8,4	8	9,8	0,6	9,6	12,3	12	11
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	90	100	80	100	38	60	90	85
Ремонтный режим работы (отключение ТГ-7 и котла №7)									
135	D, т/ч	90	170	146	150	90	170	0	140
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	5,6	8	7,5	0,6	6,1	7,5	0	9,5
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	85	100	85	100	36	70	0	55
136	D, т/ч	90	170	150	150	90	170	0	140
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	5,6	8	7,5	0,6	6,1	7,5	0	9,5
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	85	100	85	100	36	70	0	55
…									
174	D, т/ч	160	170	148	150	149	210	0	170
	$B_{ПГ}$, тыс. м^3	8,4	8	7,5	0,6	7,7	12,3	0	9,5
	$B_{ДГ}$, тыс. м^3	90	100	85	100	38	60	0	55

Таблица 2

Фрагмент эквивалентной оптимальной карты мощностей генераторов рассматриваемой тепловой промышленной электростанции

Суммарная выработка по ЭС, МВт	Рекомендуемая мощность, МВт								
	Станционный номер турбогенератора								
	ТГ-1	ТГ-2	ТГ-3	ТГ-4а	ТГ-4б	ТГ-5	ТГ-6	ТГ-7	ТГ-8
Нормальная схема									
173	10	10	35	5	5	23	23	23	39
174	10	10	35	5	5	23	23	23	40
…									
213	13	13	43	6	5	30	30	30	43
214	13	13	43	6	6	30	30	30	43
Ремонтный режим работы (отключение ТГ-7 и котла №7)									
132	8	8	30	5	5	23	23	0	30
135	8	8	30	5	5	26	23	0	30
136	8	8	30	5	5	27	23	0	30
….									
174	13	13	38	6	6	30	30	КР	38

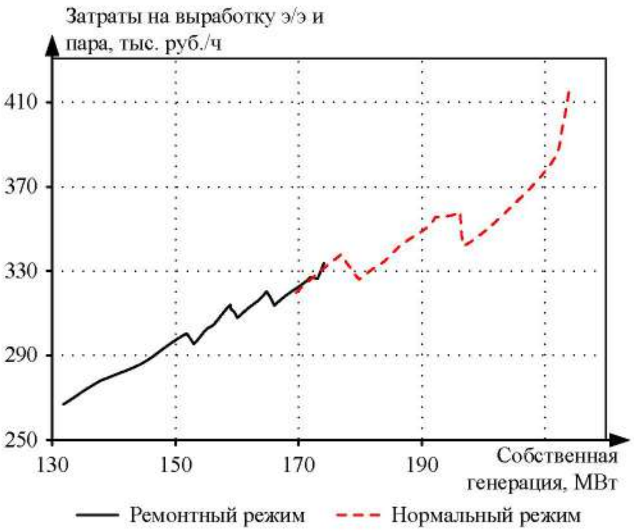


Рис. 5. Суммарные затраты на генерацию тепловой и электрической мощности нормального режима работы электростанции

Заключение

Разработанный программный продукт позволяет осуществлять комплексную оптимизацию режимов работы промышленных электростанций, учитывая при этом сезон ТЭЦ, остаточный ресурс оборудования, вид используемого топлива. Полученные оптимальные значения мощности генераторов и паропроизводительностей котлов позволяют осуществлять экономически целесообразные управляющие воздействия на электростанциях и тем самым повышать эффективность их работы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Результаты исследования применимы для решения задач технических отделов, отделов планирования энергохозяйств промышленного предприятий

Список литературы

1. Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76-85.
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S. and Khramshin V.R. "Mathematical model of the static reactive power compensator," *2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, Saratov, 2014, pp. 418-425.
3. Khramshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. and Krubcov D.S. "Electromagnetic compatibility of high power STATCOM in asymmetrical conditions," *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-6.
4. T. Wang, G. Yuan, L. Zhu and T. Yu, "Reactive power optimization of electric power system incorporating wind power based on Parallel Immune Particle Swarm Optimization," *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, Changsha, 2014, pp. 1064-1068, doi: 10.1109/CCDC.2014.6852322.
5. Z. Jinhua, "Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 193-197, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
6. Блинов А.Я. Обеспечение комплексных мер по улучшению технико-экономических показателей электростанции // Энергетик. 1975. № 2. С. 6-8.
7. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
8. Аракелян Э.К., Кормилицын В.И., Самаренко В.Н. Оптимизация режимов оборудования ТЭЦ с учетом экологических ограничений // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 29-33.
9. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Требования к виртуальным моделям тепловых электростанций и инструментам их создания // Электрические станции. 2014. № 1(990). С. 2-8.
10. Donne M.S., Pike A.W. and Savry R. "Application of modern methods in power plant simulation and control," in Computing & Control Engineering Journal, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. A. Aminzadeh, A.A. Safavi, A.R. Seifi. "Development of a hybrid simulator of a fossil fuel steam power plant", *European Control Conference (ECC) 2003*, pp. 1905-1910, 2003.
12. Бондаренко Л.В. Методы и модели управления материальными запасами топлива на тепловых электростанциях // Известия ТРТУ. 2006. № 15 (70). С. 119-122.
13. Y. Li and R. Li, "Simulation and Optimization of the Power Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou*, 2008, pp. 394-398, doi: 10.1109/PEITS.2008.103.
14. Eryurek E., Upadhyaya B.R. and Erbay A.S. "Software-based fault-tolerant control design for improved power plant operation," *Proceedings of IEEE Symposium on Computer-*

Aided Control Systems Design (CACSD), Tucson, AZ, USA, 1994, pp. 585-590, doi: 10.1109/CACSD.1994.288874.
15. Левит Г.Т. Режимные карты и оптимизация управления котельными установками //Электрические станции. 1998. № 5. С. 26-32.
16. Повышение максимальной электрической мощности тепловых электрических станций, содержащих в своем составе паросиловые и парогазовые энергоблоки / В.В. Шапошников, Б.В. Бирюков, Д.Н. Батько, Я.О. Михалко // Промышленная энергетика. 2020. №4. С. 19-25.
17. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, JunhongHao, Yiwei Zhang, FeiXu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
18. Varganova A.V. and Shemetov A.N. "Integrated in-Station Optimization of Industrial Thermal Power Plants," *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 438-442, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877662.
19. Варганова А.В. Алгоритм внутристанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17-22.
20. Построение технико-экономических моделей турбогенераторов и котлоагрегатов собственных электростанций промышленных предприятий / А.В. Кочкина, А.В. Малафеев, Н.А. Курилова, Р.П. Нетупский // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 247-252.
21. А.с. 2019618345 Российская Федерация, КАТРАН-OptHeatPower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616881; заявл. 07.06.2019; опубл. 28.06.19.
22. А.с. 2019618397 Российская Федерация. КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.19.

Поступила в редакцию 30 сентября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INTEGRATED OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL THERMAL POWER PLANTS CONDITIONS

AleksandraV. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4675-7511.

Nikolay F. Djagarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, Bulgaria. E-mail: n.dzhagarov@naval-acad.bg. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4234-4659.

The paper is devoted to one of the ways to improve the efficiency of industrial power plants management using a software product for calculating and optimizing of their modes. As a rule, the solution of optimization problems is of the deterministic nature; particular problems of control or increasing the efficiency of the functioning of a particular unit or section are solved. The authors of the paper propose an integrated approach to finding the optimal operating modes of a generating electrical installation in order to predict them and determine the best options for a given operating time. The approach is focused on the simultaneous search for optimal operating modes of generators and boilers as well as the composition of the fuel mixture, provided that the cost of fresh steam is minimized, which goes to production and heating extractions as well as electricity generation. When developing the algorithm, the distinctive features of power plant schemes, the possibility of using several types of fuel, the seasonality of operation, as well as the residual resource of the equipment were taken into account. The calculation algorithm is based on the dynamic programming method in combination with the sequential equivalent method and is implemented in the modules of the KATRAN software product. The initial data for the calculation are the technical and economic models of power equipment given in tabular form and reflecting the operational limitations. The results of the research work are intended for the planning services for the operating modes of industrial power supply systems as well as for the technical departments of power plants. The paper provides an example of a calculation under the conditions of an existing power supply system of an industrial enterprise, calculates the optimal operating maps of boilers and power diagrams of generators and predicts possible post-emergency modes of operation of heat and power equipment and their effective load in these conditions.

Keywords: thermal power plant, turbine generator, power boiler, industrial power center, in-house power generation, secondary energy resources, optimization, energy efficiency, dynamic programming.

REFERENCES

1. Varganova A.V. On the Methods of Optimization of Operating Modes of Electric Power Systems and Networks. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University]. Series: Energy, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76–85. (In Russian)
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Murzikov A.A., Karandaev A.S. and Khramshin V.R. "Mathematical model of the static reactive power compensator," *2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, Saratov, 2014, pp. 418-425.
3. Khramshin T.R., Abdulveleev I.R., Kornilov G.P. and Krubcov D.S. "Electromagnetic compatibility of high power STATCOM in asymmetrical conditions," *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015, pp. 1-6.
4. T. Wang, G. Yuan, L. Zhu and T. Yu, "Reactive power optimization of electric power system incorporating wind power based on Parallel Immune Particle Swarm Optimization," *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, Changsha, 2014, pp. 1064-1068, doi: 10.1109/CCDC.2014.6852322.
5. Z. Jinhua, "Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 193-197, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
6. Blinov A.Ya. Providing comprehensive measures to improve the technical and economic indicators of the power plant. *En-*

ergetik [Power engineer], 1975, no. 2, pp. 6-8. (In Russian)
7. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
8. Arakelyan E.K., Kormilitsyn V.I. and Samarenko V.N. Optimization of the CHPP equipment modes taking into account environmental restrictions. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1992, no. 2, pp. 29-33. (In Russian)
9. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Requirements for virtual models of thermal power plants and tools for their creation. *Elektricheskie stancii* [Electric power plants], 2014, no. 1(990), pp. 2-8. (In Russian)
10. Donne M.S., Pike A.W. and Savry R. "Application of modern methods in power plant simulation and control," in Computing & Control Engineering Journal, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. A. Aminzadeh, A. A. Safavi, A. R. Seifi, "Development of a hybrid simulator of a fossil fuel steam power plant", *European Control Conference (ECC) 2003*, pp. 1905-1910, 2003.
12. Bondarenko L.V. Methods and models of fuel inventory management at thermal power plants. *Izvestia TRTU* [Proceedings of TRTU], 2006, no. 15(70), pp. 119-122. (In Russian)
13. Y. Li and R. Li, "Simulation and Optimization of the Power Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou*, 2008, pp. 394-398, doi: 10.1109/PEITS.2008.103.
14. Eryurek E., Upadhyaya B.R. and Erbay A.S. "Software-based fault-tolerant control design for improved power plant operation," *Proceedings of IEEE Symposium on Computer-Aided Control Systems Design (CACSD)*, Tucson, AZ, USA, 1994, pp. 585-590, doi: 10.1109/CACSD.1994.288874.
15. Levit G.T. Mode maps and optimization of control of boiler plants. *Elektricheskie stancii* [Electric power plants], 1998, no. 5, pp. 26-32. (In Russian)
16. Shaposhnikov V.V., Biryukov B.V., Batko D.N. and MikhalkoYa.O. Increasing the maximum electric power of thermal power plants containing steam-power and steam-gas power units. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2020, no. 4, pp. 19-25. (In Russian)
17. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, JunhongHao, Yiwei Zhang, FeiXu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
18. Varganova A.V. and Shemetov A.N. "Integrated in-Station Optimization of Industrial Thermal Power Plants," *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 438-442, doi: 10.1109/URALCON.2019.8877662.
19. Varganova A.V. The Algorithm of the Intra-Station Unit Optimization of Operating Modes of Boiler Units and Turbo Generators for Industrial Power Plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
20. Kochkina A.V., Malafeev A.V., Kurilova N.A., Netupsky R.P. Construction of Technical and Economic Models of Auxiliary Turbine Generators and Boilers of a Power Plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 247-252. (In Russian)
21. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-Opt Active Power. Software RF, no. 2019618345 , 2019. (In Russian)
22. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-Opt Active Power. Software RF, no. 2019618397 , 2019. (In Russian)

Варганова А.В., Джагаров Н.Ф. Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 11-16. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16

Varganova A.V., Djagarov N.F. Integrated Optimization of Industrial Thermal Power Plants Conditions. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 11-16. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-11-16

Электроснабжение

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-17-25

Долгошеев В.В., Соломин Е.В., Юнусов П.А., Майоров М.А.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск

Внедрение автономных газопоршневых генераторных установок модульного типа в качестве дополнительного источника электроснабжения промышленного предприятия

В статье рассматривается дополнительное электроснабжение промышленного предприятия за счет внедрения автономных газопоршневых генераторных установок модульного типа. В современных рыночных условиях и отсутствии плановой экономики колебания спроса-предложения и, соответственно, флуктуации уровня мгновенной производственной мощности предприятия-производителя и потребления им электроэнергии могут быть весьма существенными. Кроме этого, при росте тарифов на магистральную электроэнергию одним из альтернативных решений становится собственная генерация электроэнергии. Для крупных предприятий схема электроснабжения может разделяться на базовую (снабжение от магистральной сети) и дополнительную (снабжение от локального генерирующего источника, который изначально устанавливается как модульный, с регулированием установленной мощности). Такой подход является универсальным для предприятия, поскольку при отключении электроэнергии данный генерирующий объект играет роль источника бесперебойного питания, а в течение стабильного электроснабжения помогает сэкономить ресурсы предприятия. Тем не менее экономический расчет такого дополнительного источника электроснабжения, как показывает практика, порой вызывает сложности для предприятия, в связи с чем решено опубликовать практический анализ газопоршневой генераторной установки модульного типа. Для анализа эффективности внедрения таких установок выбрано оборудование с распространенными характеристиками. Согласно проведенному анализу, когенераторные установки могут работать в параллельном режиме с основным источником энергоснабжения. Мобильность модулей позволяет за короткий промежуток времени перегруппировать состав комплектной трансформаторной подстанции (КТП), тем самым изменив ее установленную мощность. Кроме того, использование системы когенерации может быть особенно актуально на промышленных предприятиях, где необходимо осуществлять горячее водоснабжение и отопление производственных объектов и административно-бытовых помещений. Проведенные расчеты показывают, что использование газопоршневых установок для производства электроэнергии и тепла не только повышает надёжность системы электроснабжения, но и является более экономичным подходом, чем закуп энергетических ресурсов у сетевых снабжающих организаций по общим региональным тарифам. Предложенный подход может использоваться для оценки эффективности энергоснабжения от энергогенерирующих мощностей на основе возобновляемых источников.

Ключевые слова: газопоршневые установки, электрическая энергия, электроснабжение, параллельная работа источников питания.

Введение

Важнейшим фактором любого современного промышленного предприятия является качество выпускаемой продукции, при современной экономике все процессы строятся вокруг опыта взаимодействия клиента с компанией и его непрерывного совершенствования. Использование сложных непрерывных процессов производства профильной и непрофильной продукции является показателем высокотехнологичного современного производства, и, как любое передовое производство, оно должно иметь надёжное электроснабжение. Именно гарантия беспрерывного электроснабжения, минимизация возможности появления аварийных режимов, повышение качества параметров отпускаемой электроэнергии помогают обеспечить все необходимые качества для передового промышленного производства.

На сегодняшний день металлургические предприятия Челябинской области являются одними из крупнейших промышленных предприятий в России [1]. Производство на предприятиях данного типа – это обширный производственный цикл, от переработки сырья и подготовки заготовок, до выпуска разноплановой готовой продукции, аналогов некоторых позиций которой нет в мире. Получение качественной готовой продукции требует значительных электро- и энергозатрат.

В большинстве случаев электроснабжение промышленного предприятия осуществляется по нескольким независимым вводам 110 кВ, которые, в свою очередь, подразделяются ещё и на цепи. Данное решение позволяет обеспечить возможность полного электроснабжения предприятия от любой из подстанций, при нештатных режимах работы [2]. Однако все линии 110 кВ – это элементы одной большой сети, и при возникновении крупных аварий на более высоких уровнях напряжения параметры всех источников питания, независимо от цепей и раздельных вводов, могут привести к остановке производства, появлению брака, недоотпуску продукции, как следствие, к экономическим потерям, потерям престижа компании.

Исходя из этого, наиболее актуальным является вопрос изыскания возможностей повышения качества отпускаемой электроэнергии для нужд производства за счёт использования дополнительного, независимого от общей сети источника питания, без выдачи мощности в сеть 110 кВ, а также определение экономического эффекта за счёт возможности выработки электроэнергии собственным источником питания.

В настоящее время имеется много материалов об автономной работе газопоршневых генераторных установок, чего нельзя сказать о параллельной работе газопоршневых агрегатов с общей сетью электроснабжения, имеющей бесконечно большой запас мощности по сравнению с ограниченными номинальными значениями мощности ГПГУ, поэтому изучение параллельных режимов работы является наиболее актуальной задачей [3].

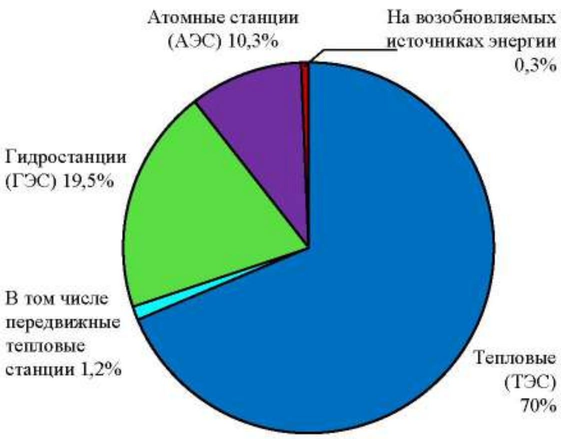
Причины выбора газопоршневых генераторных установок

По данным Росстата, баланс электропотребления за 2019 г. в Российской Федерации складывается из баланса производства электроэнергии 38,4 тыс. электростанций, действующих на территории страны [4].

Общий объем производства электроэнергии составил почти 1,081 млрд кВт·ч (90 % к уровню 2018 г.). Структура установленной мощности электростанций по типам и принадлежности приведена на **рис. 1** и **2**.

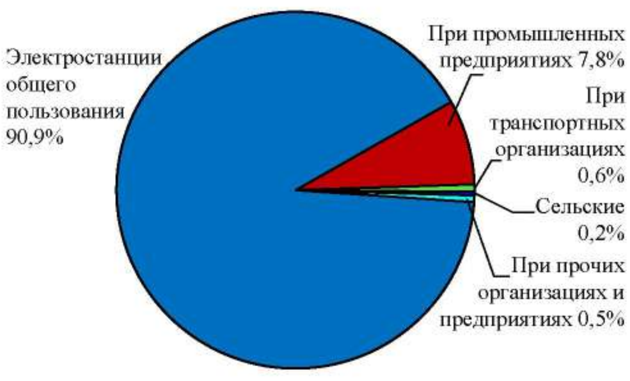
Процент электрической энергии, производимой промышленными предприятиями, достаточно велик по сравнению с транспортными или сельскими организациями, но всё равно несравнимо мал по сравнению с электростанциями общего пользования, а ведь именно от выработки электроэнергии и установки тарифа сетевыми организациями зависят многие промышленные предприятия [5].

Согласно территориальным особенностям Уральского Федерального округа большая часть производства электрической энергии приходится на ТЭС. Структура производства электроэнергии приведена на **рис. 3**.



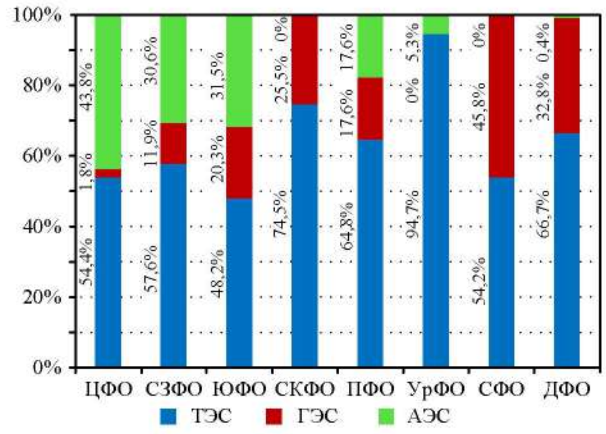
Источник данных: Росстат

Рис. 1. Структура установленной мощности электростанций Российской Федерации по типам станций в 2019 г.



Источник данных: Росстат

Рис. 2. Структура установленной мощности электростанций Российской Федерации по их принадлежности в 2019 г.



Источник данных: Росстат

Рис. 3. Структура производства электроэнергии по типам электростанций в федеральных округах Российской Федерации в 2017 году, % от выработки на территории ФО

Подавляющее большинство производимой в РФ электрической энергии производится на станциях, которые объединены в Единую энергетическую систему (ЕЭС) России, создавая тем самым для потребителей, подключённых к сети, практически неиссякаемый запас по мощности [6].

Поэтому в данной статье предлагается в виде дополнительного источника питания промышленного предприятия рассмотреть среднестатистические газопоршневые установки модульного типа, объединённые между собой в комплекс по производству электрической и тепловой энергии (ТЭС), поставляемые известной международной компанией, специализирующейся на мобильном энергоснабжении промышленных предприятий, а также предприятий нефтехимической и нефтегазовой отрасли, имеющие следующие характеристики [7]:

– двигатель Cummins QSK60G;
– генератор Stamford / Leroy Somer;
– панель управления DEIF;
– возможность подключения систем мониторинга SCADA;
– максимальная мощность: 1100 кВт на природном газе;
– номинальная мощность: 1000 кВт на природном газе;
– напряжение 0,4 кВ;
– частота 50 Гц;
– трансформатор 0,4/6,3 кВ до 22 кВ, 50 Гц;
– автономные модули с коммутационной аппаратурой и встроенной защитой;
– установленная мощность трансформаторов 6,3 МВА (2×3,15).

Основными преимуществами данного типа установок являются:

– быстрый монтаж/демонтаж оборудования, отсутствует необходимость полноценного развертывания капитального строительства;
– мобильность модулей ГПГУ, существует возможность за короткий промежуток времени перегруппировать состав КТП, тем самым изменить установленную мощность КТП;

– использование системы когенерации, что может быть особенно актуальным на промышленных предприятиях, где необходимо осуществлять горячее водоснабжение и отопление производственных объектов и административно-бытовых помещений. Так как тепловая энергия является побочным продуктом производства электрической энергии, тепловая энергия является, по сути, бесплатной. Это может в значительной степени сократить затраты на закуп и производство (энергоресурсы и фонд оплаты труда персонала эксплуатирующим оборудование по производству тепловой энергии) тепловой энергии предприятием [8];

– при комплектации энергетических комплексов современным автоматическим управлением и системами контроля возможна параллельная работа с общей сетью электрической энергии, без выдачи вырабатываемой генераторными установками мощности в сеть, что снимает с предприятия ряд сложных юридических обязательств коммерческого рынка электроэнергии.

Преимущества модульных газопоршневых установок ещё и в том, что текущий ремонт электрооборудования до 1 кВ производится на месте его установки службой эксплуатации. Капитальный ремонт силовых трансформаторов и распределительного оборудования 6 кВ может осуществляться на ремонтных предприятиях региона, а при наличии соответствующего подразделения и на территории предприятия. В организации масляного хозяйства на территории энергетического комплекса нет необходимости. На период проведения ремонтных работ со всеми ГПГУ собственные нужды энергокомплекса могут получать питание от ГПП, для чего может быть предусмотрена установка двух трансформаторов СН в ЗРУ 6кВ. Переключение на резервный источник осуществляется действиями обслуживающего персонала.

ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВКИ И ВВОДА В ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Объектом внедрения дополнительного источника питания может являться любое промышленное предприятие Челябинской области, чьё суточное электропотребление измеряется десятками МВт, так как именно от планируемого объёма необходимой производству электроэнергии гарантирующим поставщиком определяется тариф за 1 кВт·ч, что в дальнейшем весьма важно при определении экономической эффективности мероприятия по введению дополнительных источников питания.

Также следует сразу исключить возможность полного ухода в островной режим, при котором полностью исключается потребление мощности из сети, так как промышленные предприятия имеют большую динамику по загрузке производства, и в пиковых значениях забора мощности из сети могут в разы превышать установленную мощность дополнительных источников питания, которая определяется согласно усреднённым значениям архивных данных за долгосрочный период. Поэтому рассматриваемый источник питания (энергетический комплекс) принимается как дополнительный и, соответственно, предназначен для дополнительного электроснабжения промышленного предприятия с установленным ограничением по мощности.

Работа энергокомплекса осуществляется параллельно сети электроснабжения промышленного предприятия 6 кВ от ГПП.

В разных режимах работы энергокомплекса может предусматриваться дозапитка электропотребителей от основной сети 110/6 кВ, то есть при потреблении предприятием менее установленного уровня мощности дополнительных источников – питание идет полностью от энергокомплекса со ступенчатым снижением мощности, если же потребление превышает установленную энергокомплексом мощность – остаток мощности потребляется с сети 110 кВ через ПС ГПП.

Регулировка мощности энергокомплекса представлена в виде принципиальной схемы автоматики на **рис. 4**, осуществляется по условию недопущения выдачи избыточной мощности в сеть 110 кВ, для этого на вводных присоединениях ГПП устанавливается группа приборов, контролирующих направление и объем передаваемой мощности.

Функция автоматики, обеспечивающая исключение выдачи мощности в сеть, реализуется на контролерах типа AGC4 MAINS, AGC4 Genset. Сетевой контроллер в автоматическом режиме управления формирует команду автозапуска генераторным контроллерам и задает им уставку, мощности представлены в формулах (1)-(3).

$$P_{\text{зад}} = P_{\text{имп}} - P_{\text{зад.имп}}; \tag{1}$$

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{зад}} < \sum P_{\text{ном}}; \tag{2}$$

$$P_{\text{эксп}} = P_{\text{ген}} - P_{\text{имп}}, \tag{3}$$

где $P_{\text{зад}}$ – суммарное задание мощности для ГПГУ, подключенных к соответствующему вводу подстанции; $P_{\text{имп}}$ – мощность, потребляемая нагрузкой соответствующих вводов 6 кВ; $P_{\text{зад.имп}}$ – заданный импорт мощности из сети 110 кВ сетевой компании, $P_{\text{зад.имп}}$ = 1000 кВ; $P_{\text{ген}}$ – мощность, вырабатываемая ГПГУ соответствующего ввода; $P_{\text{эксп}}$ – мощность, выдаваемая ГПГУ в сеть 110 кВт.

При увеличении нагрузки мощность в первый момент потребляется из сети, затем генераторные агрегаты принимают нагрузку для снижения мощности, потребляемой из сети до заданной уставки $P_{\text{зад}}$. При снижении нагрузки генераторные агрегаты разгружаются для достижения заданного импорта мощности из сети $P_{\text{зад.имп.}}$

Уставка $P_{\text{зад.имп}}$ = 1000 кВт (заданный импорт мощности из сети) исключает возможность выдачи в сеть, так как при любой заданной уставке мощности $P_{\text{зад}}$ для ГПГУ остаются 1000 кВт, которые всегда потребляются нагрузкой из сети.

Для повышения класса напряжения на площадке энергокомплекса устанавливаются комплектные повысительные трансформаторные подстанции 0,4/6 кВ, КТП, в свою очередь, подключаются по стороне 6 кВ к закрытому распределительному устройству (ЗРУ 6 кВ), которое выполняет функции оперативного переключения, распределения и защиты, представленное в виде принципиальной схемы на **рис. 5.**

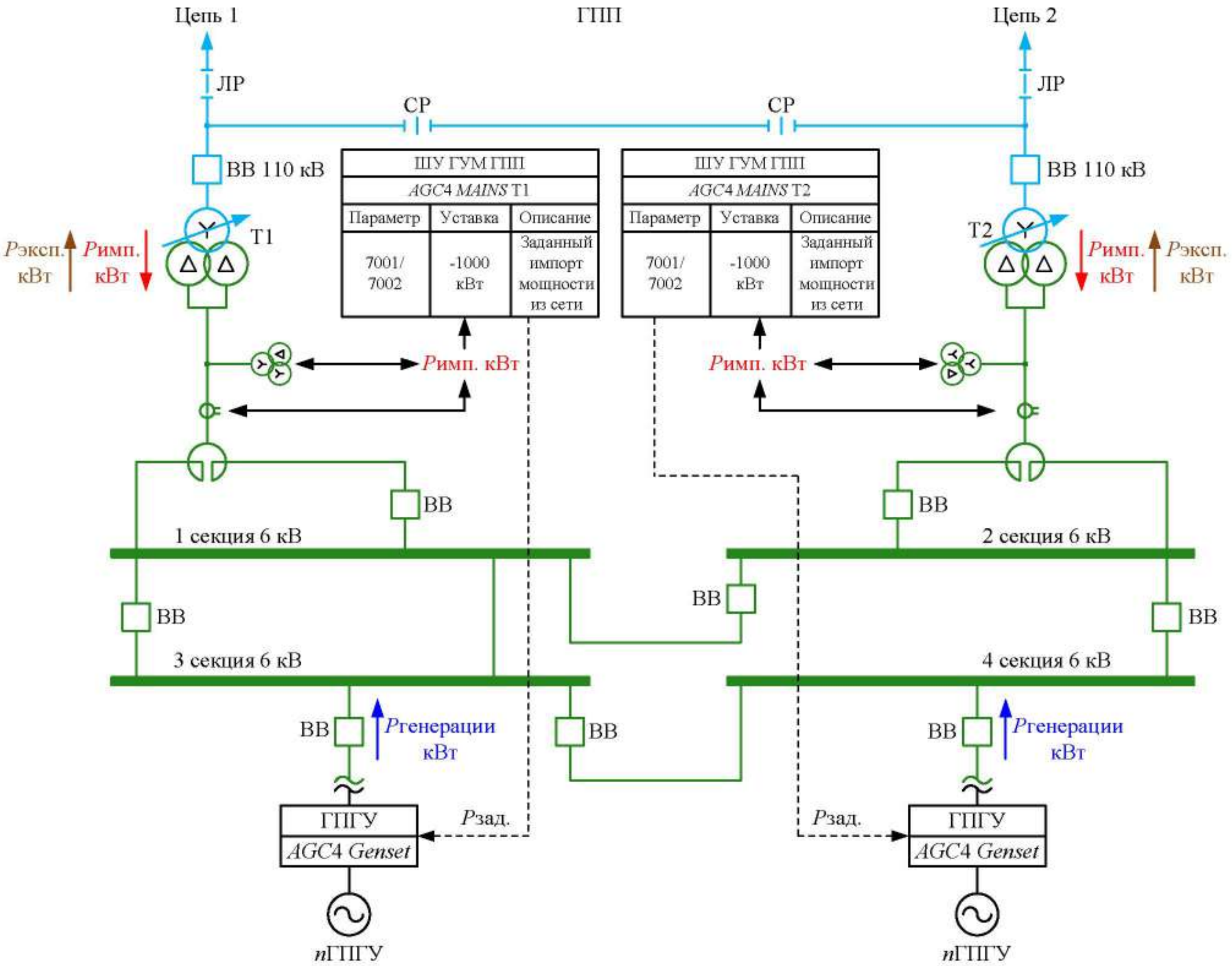


Рис. 4. Принципиальная схема автоматики, обеспечивающей исключение выдачи мощности ГПГУ в сеть 110 кВ

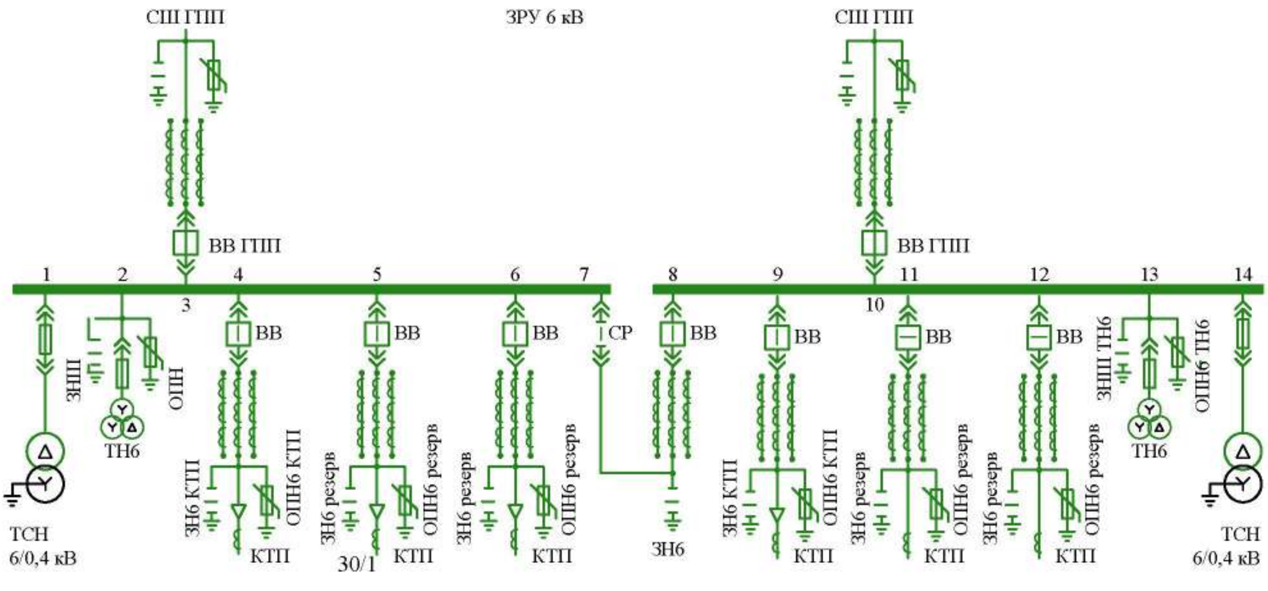


Рис. 5. Принципиальная схема закрытого распределительного устройства 6 кВ

Нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на секциях ЗРУ-6 кВ должны быть соответственно не более ±5 и ±10% от номинального напряжения электрической сети [10].

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в точках общего присоединения к электрическим сетям должны быть не более 2,0 и 4,0 % соответственно. Нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонения частоты должно быть не более ±0,2 и ±0,4 Гц соответственно.

Особенности эксплуатации при параллельной работе

Так как промышленные предприятия временами имеют плавающую нагрузку, которая может быть ниже договорной балансовой мощности, принимается схемное решение – секционировать между собой секции сборных шин ЗРУ. При этом появляется возможность конфигурировать секции по числу подключенных к ним КТП, что позволяет в случае необходимости перевести мощность в объеме до максимально возможного значения пропускной способности вводной коммутационной ячейки по каждой из линий связи 6 кВ.

В соответствии с «Требованиями к участию генерирующего оборудования в общем первичном регулировании частоты», утвержденными Приказом Минэнерго Российской Федерации №2 от 09 января 2019 года [5], к генерирующему оборудованию ГПГУ устанавливаются следующие требования:

– 6. Все генерирующее оборудование должно быть готово к участию в ОПРЧ, за исключением энергоблоков АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах, а также с реакторами большой мощности канальными.

– 8. Для участия в ОПРЧ генерирующее оборудование электростанций, за исключением СЭС, ВЭС, ВОЛЭС и генерирующего оборудования на основе ГУБТ, ДГА, должно соответствовать следующим требованиям:

а) зона нечувствительности первичного регулирования не должна превышать 0,05 Гц;

б) статизм первичного регулирования должен находиться в пределах 4,0-5,0 процентов;

в) регуляторы активной мощности, установленные на генерирующем оборудовании ТЭС, АЭС, ГЭС и ГАЭС, должны быть оснащены частотными корректорами;

г) «мертвая полоса» первичного регулирования в регуляторах активной мощности не должна превышать 50,000 ± 0,075 Гц.

– 10. При участии в ОПРЧ генерирующее оборудование должно обеспечивать изменение выдаваемой активной мощности при изменении частоты на величину требуемой первичной мощности (4):

$$P_{\text{тп}} = -\frac{100}{S}\frac{P_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}}K_{\text{Д}}\Delta f_{\text{Р}}, \qquad (4)$$

где S – статизм первичного регулирования, %; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генерирующего оборудования, МВт; $K_{\text{Д}}$ – коэффициент, учитывающий динамику выдачи первичной мощности, нормированную требованиями для разного типа генерирующего оборудования при скачкообразном характере изменения частоты, для ГПА $K_{\text{Д}}=1$; $\Delta f_{\text{Р}}$ – расчетная величина отклонения частоты, Гц, определяемая следующим образом: $\Delta f_{\text{Р}} = 0$ – при отклонениях частоты, не превышающих зону нечувствительности $f_{\text{нч}}$, Гц, или «мертвую полосу» ($50{,}00 \pm f_{\text{мп}}$, Гц) первичного регулирования; $\Delta f_{\text{Р}} \neq 0$ – при отклонениях частоты, превышающих зону нечувствительности («мертвую полосу») первичного регулирования; $\Delta f_{\text{Р}} = f\text{-}(50{,}00 + f_{\text{нч}}(f_{\text{мп}}))$ – при повышенной частоте ($\Delta f_{\text{Р}} > 0$); $\Delta f_{\text{Р}} = f\text{-}(50{,}00 - f_{\text{нч}}(f_{\text{мп}}))$ – при пониженной частоте ($\Delta f_{\text{Р}} < 0$); f – текущее значение частоты, Гц.

Подключение энергокомплекса к потребителям осуществляется через шины ГПП гибкими кабельными линиями.

Автоматизация и диспетчеризация системы электроснабжения предусматривается устройством системы мониторинга и управления оперативными переключениями.

Целями создания системы автоматизации и диспетчеризации являются: стабилизация эксплуатационных показателей оборудования и режимных параметров; предотвращение аварийных ситуаций.

Система предназначена:

– для обеспечения работы системы электроснабжения в дистанционном режиме управления;

– для предоставления оперативному и эксплуатационному персоналу необходимой информации о состоянии и режимах работы оборудования системы электроснабжения;

– для стабилизации заданных режимов процесса путём контроля параметров, визуального представления, выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы как в автоматическом режиме, так и в результате действий оператора;

– для определения аварийных ситуаций на узлах электроснабжения путём опроса подключённых к системе датчиков в автоматическом режиме, анализа измеренных значений и переключения узлов в безопасное состояние путём выдачи управляющих воздействий по инициативе оператора.

ГПГУ являются элементом непрерывно действующей системы когенерации. При работе генераторной установки происходит естественный выброс тепловой энергии, которая является побочным продуктом и может служить для систем теплоснабжения [8].

Система утилизации тепла предназначена для отвода теплоты от двигателя и выхлопных газов газопоршневой генерирующей установки, работающей в режиме непрерывной постоянной номинальной выходной мощности, и ее полезного использования. Это совокупность устройств, снимающих тепловую энергию с рубашки охлаждения и выхлопных газов двигателя и передающие ее теплоносителю внешнего контура. Система утилизации тепла устанавливается на контуре рубашки охлаждения двигателя и выхлопной системе. Теплоноситель внешнего контура после первой ступени нагрева в модуле УТА поступает на вторую ступень в модуль УТГ для догрева. В модуле УТГ происходит теплообмен между выхлопными газами и теплоносителем внешнего контура (**рис. 6**).

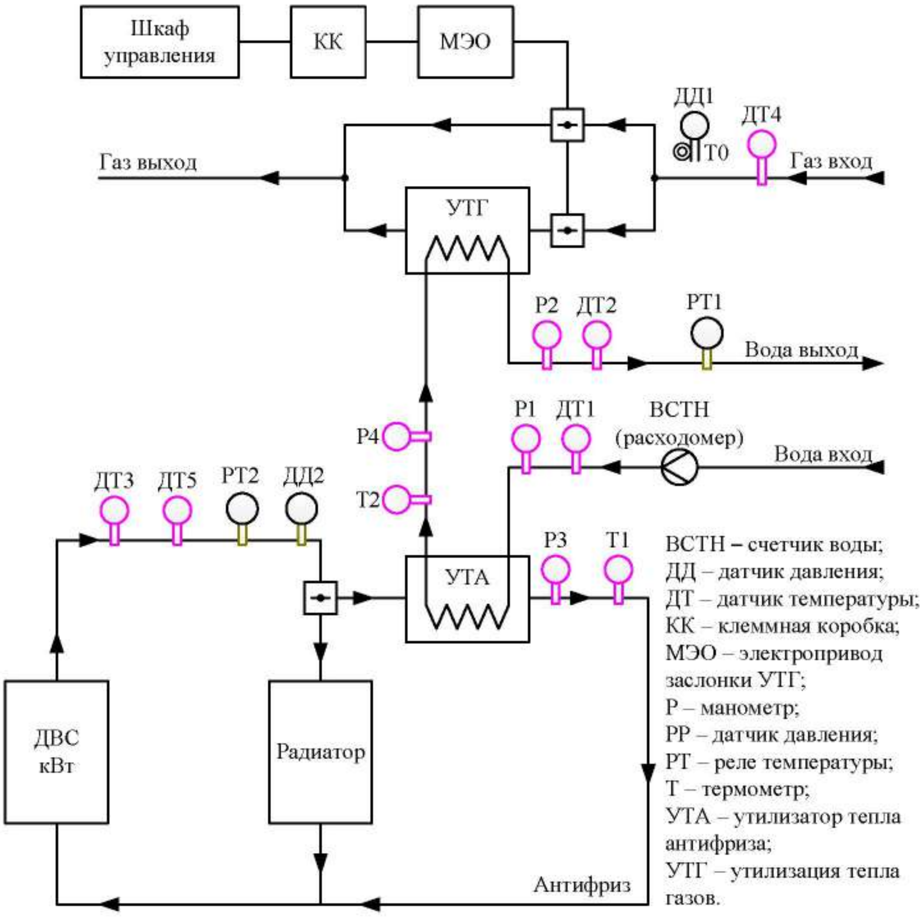


Рис. 6. Схема системы утилизации тепла

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Одной из особенностей использования модульной ГПУ является то, что промышленное предприятие не несёт никаких капитальных затрат на возведение и пуск энергетических комплексов дополнительного питания. Все расходы по монтажу, наладке и пуску оборудования в эксплуатацию берёт на себе генподрядная организация. Оплата с предприятия берётся в виде ежемесячной аренды энергетического оборудования, которая определяется от гарантированного договорного объёма электрической энергии, которую предприятие обязуется брать от генерации. Иными словами, предприятие обязуется обеспечивать генераторные агрегаты нагрузкой для выработки электрической энергии.

Расчёт платежей за аренду Объекта производится по следующей формуле:

$$ЕСП = V_{ээ} P_{ээ} \left(1 - C_{кээ}\right) - V_{газ} P_{газ}, \qquad (5)$$

где *ЕСП* – размер арендной платы, подлежащей оплате Арендатором, руб.; $V_{ээ}$ – фактический объем электроэнергии по показаниям приборов учета, отпущенной ТЭС за расчетный месяц; $P_{ээ}$ – цена электроэнергии, определенная в соответствии с договором между арендатором и энергоснабжающей организацией, которая определяется счетом-фактурой к счету за фактически потребленную Арендатором электроэнергию; $C_{кээ}$ – скидка к стоимости электроэнергии, отпущенной ТЭС за расчетный месяц, составляющая коэффициент 0,25; $V_{газ}$ – фактический объем природного газа по показаниям приборов учета, израсходованный ТЭС в расчетном месяце; $P_{газ}$ – фактическая цена природного газа, определенная в соответствии с договором между арендатором и газоснабжающей организацией, которая определяется счетом-фактурой к счету за фактически приобретенный арендатором газ.

Из формулы видно, что дисконт от действующих тарифов в части выработки:

– на электрическую энергию составляет – 25%;
– на тепловую энергию составляет – 100%.

Проведем условный расчёт. Допустим, что у предприятия гарантированный договорной объём по выработке электроэнергии:

$V_{ээ}$ = 15 000 000 кВт·ч.

По данным ООО «Уралэнергосбыт» [9], средняя стоимость 1 кВт·ч электрической энергии за вторую половину 2019 года была

$P_{ээ}$ = 3,8 руб.

Согласно паспортным характеристикам, на производство 1 кВт электроэнергии ГПГУ типа Stamford затрачивает объём природного газа в размере

$V_{газ}$ = 0,314 м^3.

По данным ООО «Уралэнергосбыт» [3], средняя стоимость 1 м^3 природного газа за вторую половину 2019 года была:

$P_{газ}$ = 3,7 руб.

Тогда

$$ЕСП = 15000000 \cdot 3,8 \cdot \left(1 - 0,25\right) - 0,314 \cdot 3,7 = = 25323000 \text{ руб.},$$

при этом потрачено на закуп газа

$Q_{газа} = 17427000$ руб.

Общие затраты

$$Q_{собст.ген} = ЕСП + Q_{газа}, \quad (6)$$

$$Q_{собст.ген} = 25323000 + 17427000 = 42750000 \text{ руб.}$$

Аналогичный объём электроэнергии с рынка снабжающей организации стоил бы

$$Q_{сетевой\ орг} = V_{ээ} P_{ээ}, \quad (7)$$

где $Q_{сетевой\ орг}$ – размер платы за электроэнергию с рынка снабжающей организации, руб.

Тогда

$$Q_{сетевой\ орг} = 15000000 \cdot 3,8 = 57000000 \text{ руб.}$$

В сравнении

$$Q_{сетевой\ орг} > Q_{собст.ген}.$$

По результатам вычислений можно сказать, что использование газопоршневых установок для производства электроэнергии и тепла не только повышает надёжность системы электроснабжения, но и будет экономичней, чем закуп энергетических ресурсов у сетевых снабжающих организаций по общим региональным тарифам.

Заключение

Развитие промышленности не стоит на месте, год от года промышленному производству приходится сталкиваться с более жёсткими и принципиальными задачами, условиями, требованиями, которые заставляют выходить на современный, эргономичный, более качественный уровень взаимодействия с клиентом, партнёрами, государством. Но ресурсы любого предприятия ограничены, и новые объёмы требований, новые задачи клиентов требуют дополнительных вложений, развития, ресурсов. В условиях современной экономики необходим максимально эффективный баланс между ресурсами, которые предприятие готово потратить на производство качественного продукта и итоговой стоимостью этого продукта. Поскольку снижение затрат на производство продукта за счёт снижения его качества – деструктивный подход [10], который ведёт к потере клиентов, имиджа, места на рынке, остаётся только один метод – пересматривать способы получения энергетических ресурсов для производства продукта. Основные виды энергетических ресурсов промышленного предприятия – это электрическая и тепловая энергия, которые в подавляющем большинстве случаев закупаются у сетевого регионального оператора-поставщика. Полный уход с оптового рынка часто не рационален и может привести к более серьёзным экономическим потерям, «золотой серединой» может являться введение дополнительного источника питания, который будет работать в параллели с основным. На сегодняшний день существует достаточно много дополнительных источников питания, это могут быть установки на базе возобновляемых источников энергии, таких как солнечные электростанции, ветровые энергетические установки различных типов, тепловые насосы, энергия биомассы и энергия рек. Это также могут быть автономные станции по производству энергоресурсов на основе традиционных источников энергии. В каждом случае необходим индивидуальный подход и выбор такого дополнительного источника энергии, который будет максимально эффективен с экономической точки зрения. В условиях Уральского Федерального округа и локально развитой системы газоснабжения рациональным будет введение дополнительного источника энергии, который будет использовать данный энергетический ресурс для производства электрической энергии.

Таким образом, использование такого дополнительного источника питания, как газопоршневая генераторная установка, может являться оптимальным решением при смешанном режиме электроснабжения промышленного предприятия, обеспечивая дисконтированное электроснабжение по отношению к установленному региональному тарифу на электроэнергию.

Собственная генерация не только обеспечивает дисконтированную ставку на закуп электроэнергии с оптового рынка, но и сводит затраты на производство или закуп тепловой энергии до нуля. За счёт использования системы когенерации тепловая энергия не только эффективно снимается и отводится от газопоршневых агрегатов системой утилизации тепла, но и передаётся в сеть теплоснабжения промышленного предприятия, и главной задачей энергетических служб является распределение этого тепла по сетям и передача потребителю. Установки данного типа приносят большой экономический эффект за счет того, что отсутствует необходимость иметь собственные котельные и держать сменный персонал для их эксплуатации, тем самым экономя не только на закупе энергетических ресурсов, но и на содержании основных средств в виде автономных тепловых пунктов, на фонде оплаты труда обслуживающего персонала котельных [11].

Высокая степень надежности, относительно невысокая стоимость, а также простота в эксплуатации газопоршневой генераторной установки дает ей больше преимуществ по сравнению с другими способами получения или покупки энергоресурсов [12].

Список литературы

1. Обзор рынка черной металлургии. Delloite. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/research-center/metals-2h-2019.pdf (дата обращения: 28.10.2020).
2. Бессолицын А.В, Кушкова Е.И., Петров Н.В. Оценка сокращения ущерба от недоотпуска электроэнергии при реализации неполнофазного нагрузочного режима воздушных линий 110 кВ // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №3. С. 77-80.
3. Мухарямов М.А., Хаустова Е.В. Автономное энергообеспечение с помощью газопоршневых установок // Наука, образование, общество: тенденции перспективы: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 2014 г.,

Москва. М.: АР-Консалт, 2014. С. 74-75.
4. Основные характеристики российской электроэнергетики / Министерство энергетики Российской Федерации. https://minenergo.gov.ru/node/532 (дата обращения: 26.10.2020).
5. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 09.01.2019 г. № 2 «Об утверждении требований к участию генерирующего оборудования в общем первичном регулировании частоты и внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. № 229» // Российская газета. https://rg.ru/2019/02/02/minenergo-prikaz-2-site-dok.html (дата обращения: 26.10.2020).
6. Лимонов А.С. Обеспечение энергобезопастности и повышение экономических показателей деятельности предприятий внедрением когенерационных установок // Научно-технический прогресс как фактор развития современного общества: сб. ст. междунар. науч.-практ. конференции, 2019.
7. Техническая спецификация газового генератора. https://www.aggreko.com/ru-ru/products/generator-rental/generators/gas-generators/container-gas-generator-1375kva (дата обращения: 28.10.2020).
8. Шелгунов А.В. Сравнительный анализ автономных энергоцентров с когенерацией и тригенерацией // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. №3. С. 129-140. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-3-129-140.
9. Тарифы и нормативы / ООО «Уралэнергосбыт». https://uralsbyt.ru/clients/tarify-normativy-zakonodatelstvo/tarify-i-normativy/ (дата обращения: 26.10.2020).
10. Нечаева В.В. Совершенствование качества и сокращение затрат совместимы // Научные исследования. 2018. №5(24). С. 49-51.
11. Ховалова Т.В. Моделирование эффективности перехода на собственную генерацию // Эффективное антикризисное управление. 2017. №3(102). С. 44-57.
12. Что дает собственная генерация предприятию / ГК «МКС». https://mks-group.ru/a/sobstvennaya-generaciya-na-predpriyatii (дата обращения: 01.11.2020)

Поступила в редакцию 27 сентября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPLEMENTATION OF AUTONOMOUS MODULAR GAS-PISTON GENERATOR EQUIPMENT IN THE FORM OF ADDITIONAL SOURCE OF POWER SUPPLY FOR INDUSTRIAL ENTERPRISE

Viktor V. Dolgosheev

Postgraduate student, Electric Power Generation and Supply Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: nrgvictor@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4747-7004.

Evgeniy V. Solomin

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Generation and Supply Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: solominev@susu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4694-0490.

Parviz A. Yunusov

Postgraduate student, Electric Power Generation and Supply Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gamberro90@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1854-5282.

Mikhail A. Mayorov

Postgraduate student, Electric Power Generation and Supply Department, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: michaelmaiorov@gmail.com.ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1221-8862.

The article considers additional power supply to an industrial enterprise due to the introduction of Autonomous gas-piston generator sets of modular type. In modern market conditions and the absence of a planned economy, fluctuations in supply and demand and, consequently, fluctuations in the level of instantaneous production capacity of the producer enterprise and its electricity consumption can be very significant. In addition, with the growth of tariffs for mainline electricity, one of the alternative solutions is in-house generation of electricity. For large enterprises, the power supply scheme can be divided into a basic one (supply from the main network) and an additional one (supply from a local generating source, which is initially installed as a modular one, with installed capacity regulation). This approach is universal for any enterprise, since this generating facility plays the role of an uninterruptible power supply during power outages, and during the stable power supply, it helps to save the company resources. However, the economic calculation of such an additional source of power supply, as practice shows, sometimes causes difficulties for the enterprise, and therefore it was decided to publish a practical analysis of a gas-piston generator set of a modular type. To analyze the effectiveness of implementing such installations, the equipment with common characteristics was selected. According to the analysis, cogeneration plants can operate in parallel with the main power supply source. The mobility of the modules allows you to regroup the composition of a complete transformer substation (KTP) in a short period of time, thereby changing its installed capacity. In addition, the use of a cogeneration system can be especially relevant in industrial enterprises where it is necessary to provide hot water supply and heating of industrial facilities and administrative and household premises. The calculations show that the use of gas-piston installations for electricity and heat production not only increases the reliability of the power supply system, but is also a more economical approach than purchasing energy resources from grid supply organizations at General regional tariffs. The proposed approach can be used to assess the efficiency of energy supply from power generating facilities based on renewable sources.

Keywords: gas piston units, electrical energy, power supply, parallel operation of power sources.

REFERENCES

1. Ferrous metallurgy market overview. Delloite. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Docume

nts/research-center/metals-2h-2019.pdf (accessed 28 October 2020).

2. Bessolitsyn A.V, Kushkova E.I., Petrov N.V. Assessment of damage reduction from undersupply of electricity during implementation of the open-phase load mode of 110 kV overhead lines. *Izvestiya vuzov. Elektromehanika* [Bulletin of Universities. Electrical engineering]. No. 3, 2014. Pp. 77-80. (In Russian)
3. Muharyamov M.A., Haustova E.V. Autonomous power supply using gas-piston equipment. *Nauka, obrazovanie, obscshestvo: tendentsii i perspektivy: sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science, education, society: trends and prospects: collection of scientific papers of the International scientific conference]. Moscow: AP-Konsalt, 2014, pp. 74-75. (In Russian)
4. The main characteristics of the Russian power industry. *Ministry of Energy of the Russian Federation*. https://minenergo.gov.ru/node/532 (accessed 26 October 2020). (In Russian)
5. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 09.01.2019 No. 2 "On approval of the requirements for the participation of generating equipment in the general primary regulation of frequency and amending the Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation approved by the order of the Ministry of Energy of Russia dated June 19, 2003 No. 229 ". *Russian newspaper*. https://rg.ru/2019/02/02/minenergo-prikaz-2-site-dok.html (accessed 26 October 2020). (In Russian)
6. Limonov A.S. Ensuring energy safety and improving the economic performance of enterprises by implementing cogeneration plants. [Scientific and technological progress as a factor of modern society development: collection of scientific papers of the international scientific conference]. Ufa, Omega Science, 2019, pp. 130-133. (In Russian)
7. Technical specification of the gas generator. https://www.aggreko.com/ru-ru/products/generator-rental/generators/gas-generators/container-gas-generator-1375kva (accessed 28 October 2020). (In Russian)
8. Shelgunov A.V. Comparative analysis of Autonomous power centers with cogeneration and trigeneration. *Silovoe i energeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy* [Power engineering equipment. Independent systems], no. 3, 2019, pp. 129-140. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-3-129-140. (In Russian)
9. Tariffs and standards. *Uralenergosbyt*. https://uralsbyt.ru/clients/tarify-normativy-zakonodatelstvo/tarify-i-normativy/ (accessed 26 October 2020). (In Russian)
10. Nechaeva V. V. Simultaneous improving the quality and reducing costs. *Nauchnye issledovaniya* [Scientific research], no. 5(24), 2018, pp. 49-51. (In Russian)
11. Khovalova T. V. Modeling the effectiveness of the transition to the in-house power generation. *Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie* [Effective crisis management], no. 3(102), 2017, pp. 44-57. (In Russian)
12. What does the company in-house power generation provide? GK MKS https://mks-group.ru/a/sobstvennaya-generaciya-na-predpriyatii (accessed 1 November 2020). (In Russian)

Внедрение автономных газопоршневых генераторных установок модульного типа в качестве дополнительного источника электроснабжения промышленного предприятия / В.В. Долгошеев, Е.В. Соломин, П.А. Юнусов, М.А. Майоров // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 17-25. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-17-25

Dolgosheev V.V., Solomin E.V., Yunusov P.A., Mayorov M.A. Implementation of Autonomous Modular Gas-Piston Generator Equipment in the Form Of Additional Source of Power Supply for Industrial Enterprise. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 17-25. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(49)-17-25

УДК 621. 314.222.6:621.33 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29

Григорьев Н.П., Воприков А.В., Ковалев В.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов

Статья посвящена вопросу повышения срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов. В работе выполнен анализ подключения тяговой подстанции к контактной сети по схеме «подпитывающей». Такое решение не соответствует классической схеме подключения в системе тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. Силовые трансформаторы в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог (ЭлЖД) мощностью, как правило, 40 МВА являются дорогостоящим электротехническим оборудованием. Современные силовые трансформаторы в системе электроснабжения переменного тока соответствуют стандартам и характеризуются параметрами трансформаторов, выпускаемых в прошлые годы. Таким образом, применение новых трансформаторов заменой установленных ранее приводит к значительным капиталовложениям. При этом технико-экономические показатели работы новых силовых трансформаторов не могут приводить к существенному повышению экономических показателей в системе электроснабжения ЭлЖД переменного тока 25 кВ без учета схем подключения. Мгновенные значения токов плеч приняты реальными в целях выполнения качественной оценки эффективности схемы. Ограничением выбора схемы подключения подстанции, присоединенной к контактной сети по схеме «подпитывающей», является неизменная фазировка смежных подстанций. Доказана нормализация распределения токов плеч питания при подключении рассмотренной подстанции к контактной сети по классической схеме. Сопряжение тяговой сети межподстанционной зоны выполнено применением поста секционирования, подключенного по схеме «четырехугольника». При этом питание тяговых нагрузок осуществляется по петлевой схеме. Повышение срока службы силовых трансформаторов доказано существенным снижением температуры наиболее нагретой точки обмотки при присоединении трансформатора по классической схеме

Ключевые слова: силовой трансформатор, система тягового электроснабжения, срок службы, износ изоляции, пост секционирования.

Введение

Повышение срока службы силовых трансформаторов тяговых подстанций является современным мероприятием, направленным на повышение эффективности работы системы электроснабжения электрифицированных железных дорог (ЭлЖД) переменного тока 25 кВ [1].

На Дальневосточной железной дороге (ДВЖД) система ЭлЖД содержит 31 тяговую подстанцию. Три из них с нетиповой схемой подключения к контактной сети. Такие схемы подключения тяговых подстанций нашли применение при ранее установленных смежных тяговых подстанциях с целью обеспечения нормируемого напряжения в тяговой сети.

Результаты исследования и обсуждения

Рассмотрим особенность работы одной из отмеченных подстанций на примере 21 тяговой подстанции (**рис. 1**).

Подстанция 21 подключена к левому и правому плечам одной обмоткой и питает их фазой *B* ЛЭП. В соответствии со схемой подключения тяговой подстанции 21 (**рис. 1**), выполним определение токов обмоток напряжения 27,5 кВ трансформатора. Совместив вектор напряжения фазы *A* ЛЭП с действительной осью на комплексной плоскости, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
\dot I_{ax} &= \frac{2}{3} I_{\text{Л}} e^{j(240-\varphi_{\text{Л}})} + \frac{2}{3} I_{\text{П}} e^{j(240-\varphi_{\text{П}})};\\
\dot I_{by} &= -\frac{1}{3} I_{\text{Л}} e^{j(240-\varphi_{\text{Л}})} - \frac{1}{3} I_{\text{П}} e^{j(240-\varphi_{\text{П}})};\\
\dot I_{cz} &= -\frac{1}{3} I_{\text{Л}} e^{j(240-\varphi_{\text{Л}})} - \frac{1}{3} I_{\text{П}} e^{j(240-\varphi_{\text{П}})}.
\end{aligned} \qquad (1)$$

При условии мгновенного значения векторов токов правого ($\dot I_{\text{П}}$) и левого ($\dot I_{\text{Л}}$) плеч в фазных координатах и фазовом сдвиге тока плеча относительно питающего напряжения -37° ($\dot I_{\text{П}} = \dot I_{\text{Л}} = 500\, e^{j203}$) модуль тока обмотки трансформатора *ax* составит около 667 А, что в два раза превышает модуль тока обмоток *by* и *cz*, который составит 333 А. Такое распределение токов плеч по обмоткам приводит к низкому коэффициенту использования мощности силового трансформатора и перегрузке обмотки *ax* в отдельных поездных ситуациях.

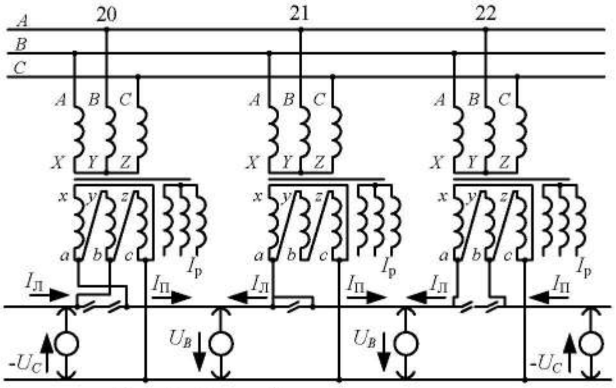


Рис. 1. Схема фазировки реального участка тяговой сети

Принятое в системе электроснабжения ЭлЖД ДВЖД схемное решение приводит к существенному повышению несимметрии токов обмоток высшего напряжения и нагрузки тяговой подстанции на ЛЭП даже при равных токах левого и правого плеч.

В целях повышения эффективности работы посредством нормализации распределения токов плеч тяговой нагрузки в силовом трансформаторе тяговых подстанций предлагается подключение силового трансформатора к контактной сети по классической схеме (**рис. 2**).

При этом на правое плечо 21 подстанции подано обратное напряжение фазы *A* ЛЭП. Сопряжение правого плеча подстанции 21 и левого плеча подстанции 22 выполним применением нейтральной вставки. Схема предлагаемого поста секционирования (ПС) обеспечивает проход поездов 5 по разделу тяговой сети с нейтральной вставкой без опускания токоприемника при отключенном токе [2] (**рис. 3**). Такое решение позволяет сохранить неизменной фазировку всех подстанций, расположенных правее подстанции 21.

При этом питание межподстанционной зоны выполняется петлевыми схемами от подстанций 21 и 22. В работе [3] для межподстанционных зон тяговой сети при значительной разности напряжения предложен новый пост секционирования тяговой сети (см. **рис. 3**).

Выключатели 1 и 4 при включенном положении обеспечивают соединение контактной сети четного и нечетного путей на участках, подключенных к подстанциям 21 и 22 соответственно.

Выключатели 2 и 3 в положении «Отключено» обеспечивают раздельное питание поездов 5 от подстанций 21 или 22 в зависимости от координаты поезда.

В предлагаемой схеме (см. **рис. 2**) токи обмоток подстанции 21 $\dot I_{ax}$, $\dot I_{by}$ и $\dot I_{cz}$ определяются системой уравнений:

$$\dot I_{ax} = \frac{2}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} - \frac{1}{3} I_{П} e^{j(-\varphi_{П})};$$

$$\dot I_{by} = -\frac{1}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} - \frac{1}{3} I_{П} e^{j(-\varphi_{П})}; \qquad (2)$$

$$\dot I_{cz} = -\frac{1}{3} I_{Л} e^{j(240-\varphi_{Л})} + \frac{2}{3} I_{П} e^{j(-\varphi_{П})}.$$

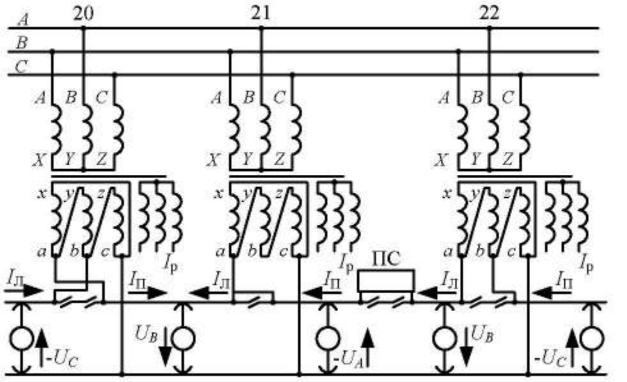


Рис. 2. Схема предлагаемой фазировки участка тяговой сети

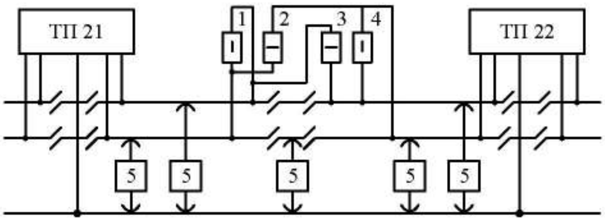


Рис. 3. Новый пост секционирования

Следовательно, применение на рассматриваемой тяговой подстанции классической схемы подключения трансформатора к контактной сети обеспечивает снижение модуля тока наиболее загруженной обмотки *ax* с 667 до 441 А или на 34 %. При этом модули токов обмоток *by* и *cz* соответственно равны 167 и 441 А.

Рассмотрим износ (L) изоляции обмоток при принятой схеме присоединения трансформатора (см. **рис. 1**) 21 тяговой подстанции. В работах [4–7] доказано, что неравные модули токов обмоток силовых трансформаторов создают неравномерный износ изоляции обмоток.

Основным фактором, влияющим на скорость старения изоляции обмоток, является нагрев [8–10]. Нагрев обусловлен потерями мощности в трансформаторе, где 80% потерь мощности приходится на потери в меди при номинальном токе, а остальные 20% – в стали.

Для расчета термического износа изоляции класса нагревостойкости «А» обмотки, лимитирующей срок эксплуатации трансформатора, при косвенном определении температуры наиболее нагретой точки $\Theta_{ннт}$ получено уравнение (3) в соответствии со стандартом МЭК 60076-7 [11, 12], в работах [13,14].

$$L_{ax} = \sum_{n=1}^{N} 2^{\left(\Theta_{TO} + \Delta\Theta_{HR}\left(I_{ax}/I_R\right)^{2m} - 98\right)/6} \cdot t_n\,, \qquad (3)$$

где Θ_{TO} – температура верхних слоев масла, °C; $\Delta\Theta_{HR}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки относительно температуры верхних слоев трансформаторного масла, °C; I_{ax} – ток обмотки *ax*, А; I_R – номинальный ток, А; m – коэффициент тепловой инерции обмотки; 6 – температурный интервал; t_n – период, за который определяется износ.

Например, для трансформатора типа ТДТНЖ-25000/110/27,5/10, при температуре окружающей среды 20°C, продолжительности нагрузки более 150 минут, что соответствует установившемуся режиму нагрева, получены результаты, представленные на гистограмме **рис. 4**. Гистограмма температуры наиболее нагретых точек обмоток доказывает существенное превышение нормированного значения температуры обмотки *ax*, что соответствует схеме подключения (**рис. 1**). Применение классической схемы соединения трансформатора с контактной сетью создает снижение интенсивности износа изоляции обеспечением соответствия температуры наиболее нагретых точек нормируемым значениям.

Для повышения срока эксплуатации силовых трансформаторов реальной подстанции (**рис. 2**) необходимо установить две нейтральные вставки и пост секционирования тяговой сети. Применение поста секционирования по схеме четырехугольника позволяет создавать схемы питания тяговых нагрузок при переходе к петлевым схемам питания контактной сети.

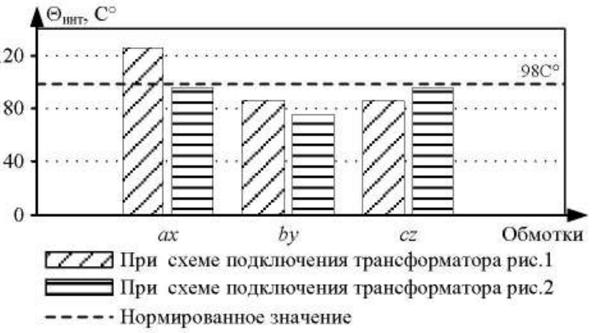


Рис. 4. Гистограмма $\Theta_{инт}$ обмоток трансформатора *ax*, *by* и *cz*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подключение трансформаторов к контактной сети по классической схеме обеспечит снижение тока наиболее нагруженной обмотки, например при равных модулях и углах сдвига относительно питающих напряжений токов левого и правого плеч питания на 34%.

2. Результаты анализа влияния классической схемы подключения силовых трансформаторов на износ изоляции обмоток доказали, что интенсивность износа обмотки, лимитирующей срок эксплуатации трансформатора, снижается, что обеспечивает продление срока эксплуатации силового трансформатора.

3. Пост секционирования предлагается выполнять по схеме четырехугольника, что обеспечит повышение эффективности работы системы электроснабжения ЭлЖД переменного тока 25 кВ за счет применения петлевых схем питания тяговых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Повышение эффективности работы системы переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, Л.В. Марченко, А.П. Парфианович, П.Н. Трофимович // Электроника и электрооборудование транспорта. 2019. № 2. С. 15-17.
3. Пат. 2706634 Российская Федерация, МПК B60M 3/04 (2006.01). Устройство тяговой сети переменного тока / Григорьев Н.П., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». №2018135346; заявл. 05.10.2018; опубл. 19.11.2019.
4. Пат. 2540685 Российская Федерация, МПК B60M 3/02, H02J 3/00. Способ подключения тяговых трансформаторов в системе переменного тока 25 кВ / Григорьев Н.П., Воприков А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». № 2013135890/11; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.02.2015.
5. Григорьев Н.П., Воприков А.В. Выбор схем подключения силовых трансформаторов тяговых подстанций электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 4. С. 90-97.
6. Voprikov A.V., Grigoriev N.P., Parfianovich A.P. Extending the life of power transformers of traction substations of alternating current of electric railways // VIII International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia), 2020, pp. 52-59. DOI 10.1007/978-3-030-37916-2_6.
7. Воприков А.В. Продление срока эксплуатации силовых трансформаторов при реконструкции тяговых подстанций переменного тока железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 4. С. 32-35.
8. Gamez C. Power Transformer // Transformers Magazine. 2014, vol. 1, iss. 1, pp. 19-21.
9. Naderian A., Pattabi P., Lamarre L. Improving the assessment of remaining life of service aged power transformers // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 330-334. DOI 10.1109/EIC43217.2019.9046610.
10. Mohsen Hosseinkhanloo, Seyed Hadi Mousavi Motlagh, Ali Naderian Jahromi, Navid Taghizadeghan Kalantari. Improving the ageing rate of transformer fleet using imperialist competitive algorithm // IET Generation Transmission & Distribution, 2020, vol. 14, no. 20, pp. 4363-4370. DOI 10.1049/iet-gtd.2020.0052.
11. International standard. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7. Geneva, Switzerland, 2005. 122 p.
12. B. Jean-Noël, Aubin J., McDermid W. Recent development in transformer winding temperature determination. URL: http://www.neoptix.com/literature/v1109r1_Art_Recent_dev_in_windings_temp.pdf (дата обращения 21.11.2020)
13. Grigorev N.P., Voprikov A.V., Parfianovich A.P. Increasing the operating life of power transformer winding insulation when upgrading 25-kV alternating current traction substations // Russian Electrical Engineering, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 100-103. DOI 10.3103/S1068371216020048.
14. Воприков А.В. Повышение эффективности эксплуатации силовых трансформаторов тяговых подстанций железных дорог переменного тока: дис... канд. техн. наук 05.09.03 / Воприков Антон Владимирович. Хабаровск, 2017.

Поступила в редакцию 05 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF THE SERVICE LIFETIME OF POWER TRANSFORMERS IN THE TRAIN MOVING TRAFFIC SYSTEM

Nikolai P. Grigoriev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Anton V. Voprikov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Vladimir A. Kovalev

Post graduate Student, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Arseniy P. Parfianovich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Polina N. Trofimovich

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: ptrofimovich@bk.ru.

The article is devoted to the problem of improvement of the service lifetime of power transformers in the train moving traffic system. The connection of the traction substation to the contact network according to the auxiliary supply source scheme is analyzed in the article. This circuit design does not correspond to the classical connection scheme in the power supply system of the 25 kV alternating current. Power transformers in the power supply system of electrified railways (ELR) with the wattage of, as a rule, 40 MVA are quite expensive. Modern power transformers in the AC power supply system comply with the standards and are characterized by the parameters of the transformers produced in the past. Thus, the use of new transformers by replacing previously installed ones leads to significant capital investments. At the same time, the results of the operation of new power transformers cannot lead to an increase in economic traction power supply system of the 25 kV AC values according to the accepted connection schemes. The instantaneous current values of traction loads are taken as real in order to perform a qualitative assessment of the efficiency of the circuit. Constant phasing of neighboring traction substations is a limitation of the choice of the scheme connected to the contact network according to the auxiliary supply source scheme. Normalization of the distribution current traction loads, when the traction substation is connected to the contact network according to the classical scheme, was proved. The coupling of the traction network of the intersubstation zone is made using a sectioning post connected according to the "quadrangle" scheme. Traction loads are powered according to the looping scheme. An increase in the service lifetime of power transformers was proved by a significant decrease in the temperature of the hottest point of the winding when the transformer is connected according to the classical scheme.

Keywords: power transformer, power supply system, service lifetime, insulation deprecation, section switch box.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda: utv. Rasporyazheniem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r.* [Strategy for the development of railway transport in Russian Federation for the period up to 2030: appr. by the order of Government of the Russian Federation], no. 877-r, June 17, 2008. (In Russian)
2. Grigoryev N.P., Marchenko L.V., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Improvement of traction power supply system of 25 kV alternating current. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2019, no. 2, pp. 15-17. (In Russian)
3. Grigorev N.P., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. *Ustroystvo tyagovoy seti peremennogo toka* [Traction alternating current network device]. Patent RF, no. 2706634, 2019.
4. Grigoryev N.P., Voprikov A.V. *Sposob podklyucheniya tyagovykh transformatorov v sisteme peremennogo toka 25 kV* [Connection method of power transformers in the power supply system of alternating current]. Patent RF, no. 2540685, 2015.
5. Grigoryev N.P., Voprikov A.V. Selection the schemes for connecting power transformers of traction substations of 25 kV alternating current electrified railways. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2014, no. 4, pp. 90-97. (In Russian)
6. Voprikov A.V., Grigoriev N.P., Parfianovich A.P. Extending the life of power transformers of traction substations of alternating current of electric railways // VIII International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia), 2020, pp. 52-59. DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2_6.
7. Voprikov A.V. Elongation the service lifetime of power transformers during the reconstruction of traction substations of 25 kv alternating current electrified railways. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2016, no. 4, pp. 32-35. (In Russian)
8. GamezC. Power Transformer / Carlos Gamez // Transformers Magazine, 2014, vol. 1, Issue 1, pp. 19-21.
9. Naderian A., Pattabi P., Lamarre L. Improving the assessment of remaining life of service aged power transformers // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 330-334. DOI: 10.1109/EIC43217.2019.9046610.
10. Mohsen Hosseinkhanloo, SeyedHadi Mousavi Motlagh, Ali NaderianJahromi, NavidTaghizadeghan Kalantari. Improving the ageing rate of transformer fleet using imperialist competitive algorithm //IET Generation Transmission & Distribution, 2020, vol. 14, no. 20, pp. 4363-4370. DOI 10.1049/iet-gtd.2020.0052.
11. International standard. Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7 – Geneva, Switzerland, 2005. 122 p.
12. B. Jean-Noël, Aubin J., McDermid W. Recent development in transformer winding temperature determination.URL: http://www.neoptix.com/literature/v1109r1_Art_Recent_dev_in_windings_temp.pdf (accessed 21 November 2020)
13. Grigorev N.P.,Voprikov A.V., Parfianovich A.P. Increasing the operating life of power transformer winding insulation when upgrading 25-kV alternating current traction substations //Russian Electrical Engineering, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 100-103. DOI: 10.3103/S1068371216020048.
14. Voprikov A.V. *Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii silovykh transformatorov tyagovykh podstantsiy zheleznykhdoro peremennogo toka.* Kand. Diss. [Improvement the efficiency to operation of power transformers of traction substations of alternating current electrified railways. Ph.D. Diss.]. Khabarovsk, 2017.

Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов / Н.П. Григорьев, А.В. Воприков, В.А. Ковалев, А.П. Парфианович, П.Н. Трофимович // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 26-29. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29

Grigoriev N.P., Voprikov A.V., Kovalev V.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Improvement of the Service Lifetime of Power Transformers in the Train Moving Traffic System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 26-29. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29

УДК 621.31 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-30-34

Малафеев А.В., Бакайкина О.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Цель проводимой работы заключалась в проведении кластерного анализа сетей исследуемого объекта для оценки степени наблюдаемости существующих объектов и перспективных присоединений. Для проведения кластерного анализа производился первоначально расчет суточного потребления на основании данных энергобаланса, с последующим определением мгновенных значений активной мощности. Для воздушных линий 35-110 кВ исследуемых сетей была определена погрешность полученных расчетных значений по отношению к данным, передаваемым по каналам телемеханики. Третьим необходимым параметром для проведения кластерного анализа была определена степень наблюдаемости, которая также первоначально рассчитывалась для каждой линии подстанции 35-110 кВ, а затем определялось среднее значение с учетом отходящих фидеров для каждой подстанции. На основании полученных параметров был построен трехмерный график зависимости погрешности расчета режима от степени наблюдаемости и числа фидеров и проекция этого графика. Эта проекция имеет вид линий уровня значений погрешности. Каждой области соответствует определенный интервал погрешностей. Эти области являются кластерами. Построенная диаграмма позволяет определить требуемую степень наблюдаемости, зная количество отходящих фидеров и задаваясь желаемым диапазоном погрешности. Данная информация позволяет при проектировании сформировать техническое задание на оснащение оборудованием телемеханики проектируемого объекта на основании существующего уровня наблюдаемости сетей. Проведенный кластерный анализ позволяет не только задаться определенным уровнем наблюдаемости для перспективного присоединения, но и оценить существующий уровень оснащенности сетей средствами телеизмерений. Кластеры наглядно демонстрируют уровень наблюдаемости в зависимости от количества.

Ключевые слова: кластер, степень наблюдаемости, телеизмерения, наблюдаемость, электрические сети, техническое задание, проектируемые сети, диаграмма, отходящие фидера, погрешность измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Передаваемые по каналам телемеханики (ТМ) данные не только дают возможность оценить текущие параметры режима, но и, при необходимости, позволяют спрогнозировать параметры режима в будущем [1]. В связи с переходом к управлению электроэнергетическими системами (ЭЭС) в режиме on-line методы оценивания состояния, достигнувшие в последнее время широкого применения, стали необходимым элементом в цепи обработки информации в системах управления.

Под наблюдаемостью понимают совокупность условий, обеспечивающих получение информации о значениях текущих параметров режима. Наблюдаемость можно рассматривать наряду с идентифицируемостью и прогнозируемостью [2] как одно из информационных свойств ЭЭС, которое выражается как способность системы представлять требуемую для управления информацию о её текущем состоянии.

В настоящее время способы оценивания состояния (ОС) электроэнергетических систем являются главным источником полной и достоверной информации о режиме работы ЭЭС. Повышение надежности и экономичности функционирования ЭЭС требуют дальнейшего повышения уровня оценивания состояния и модернизации программных средств анализа режимов.

Под оценкой состояния ЭЭС понимаются сборка расчетной схемы замещения с использованием телесигналов (ТС) о состоянии коммутационных аппаратов и задача расчета установившегося режима на основе телеизмерений (ТИ).

Усложнение топологии сети, изменение ее структуры, повышенные требования к качеству электроснабжения приводят к необходимости развития уровня контроля и наблюдаемости электрических сетей. Достаточно большое количество исследователей ведут работу в данной области с различными более узкими направленностями.

Ряд авторов работают в направлении улучшения существующих способов оценивания состояния как основного математического метода обработки данных измерений и расчета режима ЭЭС. Определяется степень влияния весовых коэффициентов измерений на результаты оценивания состояния [3].

Моделирование ЭЭС и оценивание состояния с внесением в ее структуру таких устройств, как интеллектуальные счетчики (smart meters), FACTS-устройства, синхронизированные векторные измерения, – не менее актуальное направление. Рассматривается синтезирование устройств FACTS на базе силовой электроники для оценивания состояния ЭЭС [4]. Создание интеллектуальных энергетических систем (ИЭС), предусматривающих внедрение системы широкомасштабного мониторинга режимов (WAMS), – еще одна тенденция в развитии оценивания состояния сетей [5].

В [6] предлагается методика ОС посредством глубокого обучения нейронных сетей с разработкой программного комплекса, позволяющего проводить оценивание состояния в темпе процесса для сети с наличием зашумленных или несогласованных во времени данных.

Большой интерес представляет идея внедрения устройств синхронизированных векторных измерений совместно с традиционными измерениями SCADA [7]. Работа в данном направлении уже выявила определенные сложности интеграции устройств синхронизированных векторных измерений из-за необходимости использования оптических трансформаторов тока и напряжения, определены границы применимости предлагаемого метода и выявлен способ определения мест размещения PMU-устройств, основанный на преобразовании систем нелинейных комплексных уравнений установившегося режима [8].

Для распределительных сетей на базе исследования несимметричных электрических режимов предлагается программный продукт, способный реализовать различные подходы при разработке алгоритмов оценивания состояния распределительных сетей на базе трехфазной модели ЭЭС. Хорошие результаты дала модификация метода взвешенных наименьших квадратов с ограничением типа равенств в форме расширенной матрицы Хачтела [9]. Существует еще один подход к оцениванию состояния вторичной распределительной сети низкого напряжения, основанный на использовании измерений, поступающих от интеллектуальных счетчиков. Основным преимуществом описываемого метода является использование для нелинейного ОС распределительной сети по интеллектуальным счетчикам, включающим измерения узловых мощностей, метода простой итерации [10].

Зарубежные авторы также работают в данном направлении. Есть схожие темы по повышению наблюдаемости посредством использования устройств синхронизированных измерений векторных величин (Phasor Measurement Unit – PMU). Оценка состояния сети проводится посредством правил топологической наблюдаемости с целью уменьшения количества требуемых PMU [11]. Предлагается система мониторинга и анализа, интегрируемая с технологией среды MATLAB, с использованием технологии фазовых измерительных устройств [12]. Объединение широкомасштабной измерительной системы (WAMS) и технологии SCADA с оценкой производительности путем создания математических моделей распределительной сети – не менее интересное направление [13]. Новой тенденцией является обобщенная оценка состояния ЭЭС, которая является расширением традиционной оценки состояния, включающей в себя активные и реактивные потоки мощности на выключателях как переменные состояния [14].

Ведется активная разработка различных подходов к ОС с внедрением в структуру ЭЭС различных устройств. Математическое моделирование процесса рассматривается с применением разных подходов, при этом наиболее адекватная модель обеспечит наилучшие результаты в реальной сети. Несомненно, что для оценивания состояния необходимо первоначально оценить уровень телемеханизации исследуемой сети, поскольку эффективность систем оценивания состояния ЭЭС существенным образом зависит от величины ошибок исходных данных, передаваемых по каналам ТИ, а также от качества наблюдаемости моделей ЭЭС.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

По каналам телемеханики передаются данные, определяющие параметры режима исследуемых сетей территориальной сетевой организации (ТСО). Цель проводимой работы заключалась в проведении кластерного анализа сетей исследуемого объекта для оценки степени наблюдаемости существующих сетей и возможных перспективных присоединений. В качестве объекта исследования взято одно из производственных отделений электрических сетей с преобладанием мелких населенных пунктов.

На одних объектах установленное оборудование телемеханики позволяет передавать информацию о мгновенных значениях напряжения, тока, активной, реактивной или полной мощности и частоты, что позволяет определить уровень наблюдаемости данного участка сети как высокий и позволяет проводить оценку состояния.

Другие объекты оснащены на гораздо более низком уровне или не оснащены вообще. Осуществляется передача данных лишь о некоторых параметрах режима, например на мнемосхеме подстанции присутствует лишь значение напряжения, или мощности, или тока. При этом информация может передаваться не только не в полном объеме по определенному оборудованию, но и отсутствовать вообще. На подстанциях исследуемых сетей большой процент составляют объекты, на которых информационная обеспеченность высокая на вводах силовых трансформаторах, при этом оборудованием ТМ не оснащены отходящие линии, что сильно затрудняет проведение оценивания состояния сети, так как возникает сложность даже при составлении балансовых уравнений из-за недостаточности данных.

Расчет мгновенных значений активной мощности производился на основании данных энергобаланса электрической энергии за декабрь 2019 года и контрольных замеров за характерные зимние сутки. В энергобалансе приведена информация о переданной электроэнергии по той или иной линии 35-110 кВ за каждый месяц.

Первоначально по ежечасно измеренным значениям тока и напряжения на низком уровне напряжения силового трансформатора были рассчитаны значения активной мощности для ПС, запитанной по одной линии 110 кВ. По полученным значениям был построен график нагрузок за характерные зимние сутки. В соответствии с типом трансформатора на основании его паспортных данных был произведен расчет потерь в трансформаторе. Итоговое суммарное значение потерь и потребление, полученное на основании графика, позволили определить суточное потребление для питающей линии 110 кВ.

Следующим этапом расчета было вычисление соотношения повышенного потребления электрической энергии в выходные дни по отношении к будничным. Полученное на основании графика нагрузок значение суточного потребления характерно для будничного дня, так как контрольные замеры проводились 18 декабря (среда). В декабре 2019 г. было 22 рабочих дня из 31 календарного. На основании вышеизложенного было составлено уравнение:

$$9W_{\text{в}} + 22W_{\text{б}} = W_{\text{м}}, \qquad (1)$$

где 9 – количество выходных дней в декабре 2019 г.; $W_{\text{в}}$ – суточный объем передаваемой электроэнергии в выходной день, кВт·ч; 22 – количество будних дней в декабре 2019 г.; $W_б$ – суточный объем передаваемой электроэнергии, рассчитанный на основании данных контрольных замеров, кВт·ч; $W_м$ –переданная электроэнергия за декабрь 2019 г. из данных энергобаланса, кВт·ч.

При расчетах принималось допущение, что объем электроэнергии одинаков во все будние дни и во все выходные дни.

На основании уравнения (1) был вычислен объем электроэнергии, характерный для выходного дня. Отношение полученного значения к ранее вычисленному объему суточного потребления буднего дня позволило определить повышающий коэффициент 1,23, показывающий превышение потребления электроэнергии в выходной день. Полученный коэффициент позволил рассчитать суточный объем передаваемой электроэнергии для линий 35-110 кВ в будний день, исходя из соотношения рабочих и будних дней и данных, полученных из энергобаланса:

$$W_{бр} = \frac{W_м}{1,23 \cdot (9 + 22)}, \qquad (2)$$

где $W_{бр}$ – расчетное значение суточного объема передаваемой электроэнергии в будний день, кВт·ч.

По формуле (2) был рассчитан объем передаваемой электроэнергии для линий 35-110 кВ в будний день. Из полученных значений была рассчитана активная мощность посредством деления на 24 ч.

На основании данных, передаваемых по каналам ТМ, и полученных расчетных значений была определена погрешность расчетов для каждой линии отдельно. Среднее значение погрешности было рассчитано для каждой подстанции, исходя из значений, полученных для каждого фидера отдельно, и количества присоединений.

На следующем этапе определялся второй параметр, необходимый для проведения кластерного анализа – степень наблюдаемости. Данный показатель определяет уровень информированности о параметрах режима для линии. При передаче по каналам телемеханики трех параметров, определяющих режим, степень наблюдаемости принималась равной 100% в связи с тем, что при необходимости, исходя из известных трех показателей, по аналитическим формулам можно определить остальные параметры. По объектам с более низким уровнем передачи данных степень наблюдаемости определялась пропорционально, исходя из объема передаваемой информации по каналам телемеханики.

Аналогично алгоритму определения среднего значения для погрешности производился расчет среднего значения степени наблюдаемости для каждой подстанции путем деления суммарного значения на количество отходящих линий.

Третьим параметром, необходимым для проведения кластерного анализа, было определено количество отходящих линий 35-110 кВ. Таким образом, для каждой подстанции исследуемых сетей были вычислены три показателя; результаты приведены в **таблице**.

Определяющие показатели для подстанций исследуемых сетей

ПС	Средняя погрешность, %	Средняя степень наблюдаемости, %	Кол-во отходящих линий, шт.
1	35	50	4
2	5	100	3
3	14	100	4
4	42	100	5
5	48	100	3
6	27	100	4
7	80	30	2
8	26	32	4
9	11	30	1
10	67	50	2
11	16	100	2

ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ДИАГРАММЫ И ЕЕ ПРОЕКЦИИ

Определенные выше параметры позволили построить для каждой ПС трехмерный график зависимости погрешности расчета режима от степени наблюдаемости и числа фидеров (**рис. 1**) и проекцию этого графика на плоскость, которая имеет вид линий уровня значений погрешности (**рис. 2**). Эти разноцветные области и являются кластерами.

На основании построенной диаграммы можно определить степень наблюдаемости. Зная желаемую погрешность расчета режима и проектное количество присоединений на вновь сооружаемом объекте, можно определить желаемую степень наблюдаемости в виде диапазона значений. Например, если погрешность расчета находится в рамках 20-40%, проектное число отходящих линий – 2, то желаемая степень наблюдаемости будет находится в диапазоне от 36 до 42 %. Полученный результат можно учесть в техническом задании на проектирование, задавшись средним, наибольшим или наименьшим значением.

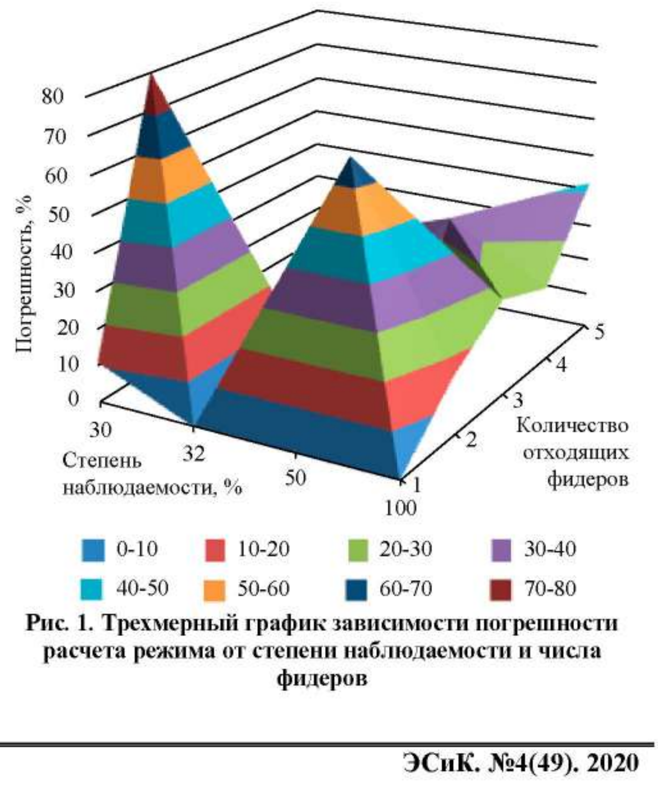


Рис. 1. Трехмерный график зависимости погрешности расчета режима от степени наблюдаемости и числа фидеров

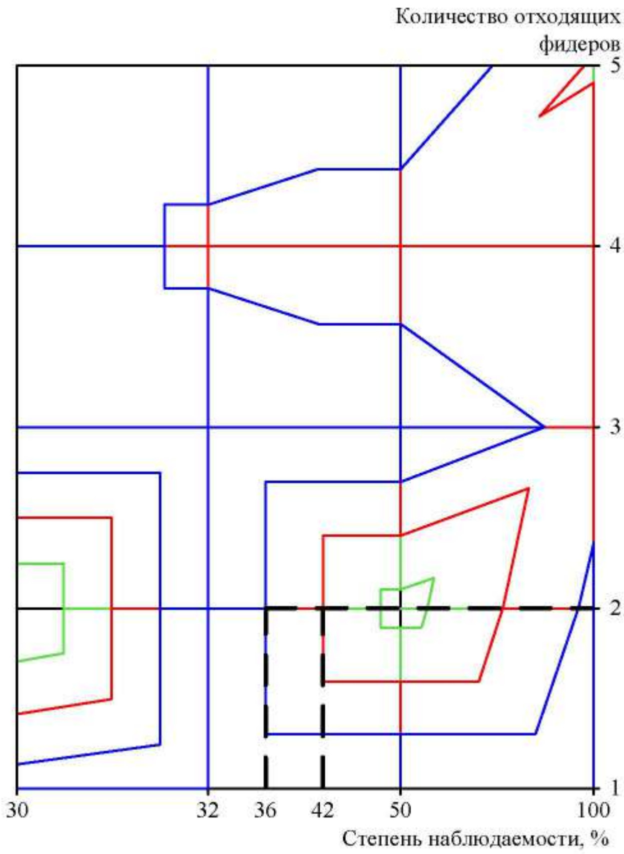


Рис. 2. Проекция трехмерного графика

Заключение

Проведенный кластерный анализ электрических сетей ТСО на основе наблюдаемости их элементов в нормальном режиме позволил определить требуемую степень наблюдаемости для проектируемых сетей на основе допустимого диапазона погрешности и перспективного числа присоединений. Данная информация позволит создать более полное и емкое техническое задание, которое при проектировании, а в дальнейшем при строительстве позволит достигнуть желаемого уровня наблюдаемости.

В процессе определения основных параметров кластерного анализа была также выявлена низкая наблюдаемость сетей в целом, что нашло отражение при проведении вычислений объема передаваемой электроэнергии и погрешности вычислений. Недостаточность данных, передаваемых по каналам ТМ, не позволила провести вычисления для всех подстанций. Степень наблюдаемости также для многих линий была низкой в связи с недостаточной информированностью.

Низкая наблюдаемость ЭЭС влечет за собой сложности выбора оптимального режима работы сетей в нормальном, послеаварийном режимах, низкий уровень контроля работы за оборудованием со стороны оперативного персонала и минимизации локализации аварий в сети.

Дальнейшая работа будет направлена на разработки комплекса дооснащения устройствами ТМ исследуемых сетей и апробации методики оценки управленческого и экономического эффекта от дооснащения объектов устройствами ТИ.

Список литературы

1. Гамм А.З., Голуб И.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. М.: Наука, 1990. 200 с.
2. Теоретические основы системных исследований в энергетике / А.З. Гамм, А.Л. Макаров, Б.Г. Санеев и др. Новосибирск: Наука, 1971. 334 с.
3. Аскаева Е.С. Влияние весовых коэффициентов измерений на результаты оценивания состояния ЭЭС // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции. 2019. С. 188-192.
4. Колосок И.Н., Тихонов А.В. Моделирование современных устройств FACTS при оценивании состояния фрагмента сети 500 кВ ОЭС Сибири // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы 90-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. 2018. С.209-218.
5. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Повышение кибербезопасности интеллектуальных энергетических систем методами оценивания состояния // Вопросы кибербезопасности. 2018. №3(27). С.63-69.
6. Домышев А.В. Оценивание состояния ЭСС с использованием глубокого обучения // Прикладные задачи математики: материалы XXVI Международной научно-технической конференции. 2018. С.183-184.
7. Бартоломей П.И., Семененко С.И. Развитие метода оценивания состояния для интеграции СВИ и измерений SCADA в ЭЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. №3-4. С.77-88.
8. Семененко С.И. Разработка алгоритмов размещения синхронизированных векторных измерений для повышения эффективности оценивания состояния ЭЭС: дис… канд. техн. наук /Семененко Сергей Игоревич. Екатеринбург, 2019.
9. Поляков И.Д. Адаптация методов оценивания состояния для моделей распределительных сетей: дис… канд. техн. наук / Поляков Илья Дмитриевич. Екатеринбург, 2019.
10. Болоев Е.В., Голуб И.И. Методы линейного и нелинейного оценивания состояния распределительной сети // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 90-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. 2018. С. 361-371.
11. Abiri E., Rashidi F. Optimal phasor measurement units placement to maintain network observability// Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2015. Iss. 28. Pp. 477-483.
12. Hussein, H.I. State Estimation via Phasor Measurement Units for Iraqi National Super Grid Power System Network// Electrical and Electronic Engineering. 2016. Iss. 1. Pp. 12-22.
13. Tao Jin, Fuliang Chu, Cong Ling, Daniel Legrand Mon Nzongo A Robust WLS Power System State Estimation Method Integrating a Wide-Area Measurement System and SCADA Technology // Copyright of Energies. 2015. Iss. 8. Pp. 2769-2787.
14. Korres G.N., Katsikas P.J. Reduced model for numerical observability analysis in generalised state estimation // Generation, Transmission and Distribution. 2015. Iss. 1. Pp. 99-108.

Поступила в редакцию 23 октября 2020 г.

Information in English

Cluster Analysis of Distribution Grid Company Electric Networks Based on the Observation of Their Elements in Normal Mode

Aleksey V. Malafeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1471-9764.

Olga A. Bakaykina

Postgraduate student, Industrial Electric Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

The purpose of the intermediate stage of work was to conduct a cluster analysis of the networks of the studied object to assess the degree of observability of existing objects and possible connections. To conduct cluster analysis, the daily consumption was initially calculated based on the energy balance data followed by the determination of the instantaneous values of active power. For 35-110 kV overhead lines of the studied networks, the error of the calculated values obtained with the data transmitted via telemechanics channels was determined. The third necessary parameter for conducting cluster analysis was the degree of observability, which was also initially calculated for each 35-110 kV substation line, and then the average value was determined taking into account the outgoing feeders for each substation. Based on the obtained parameters, a three-dimensional graph was constructed of the dependence of the mode calculation error on the degree of observability and the number of feeders and the projection of this graph. This projection had the form of lines of the level of error values. Each area corresponded to a certain error interval. These areas were the clusters. The constructed diagram allows us to determine the degree of observability, knowing the number of outgoing feeders and setting the desired error range. This information allows us to design the technical task to equip the telemechanics equipment of the designed facility based on the existing level of observability of networks. The conducted cluster analysis makes it possible both to set a certain level of observability for prospective connection and to assess the existing level of networks. Clusters clearly demonstrate the level of observability depending on the number of outgoing lines, while the compilation of a cluster analysis reveals the lack of observability of some substations.

Keywords: cluster, degree of observability, telemetry, observability, electrical networks, technical task, designed networks, diagram, outgoing feeders, measurement error.

REFERENCES

1. Gamm A.Z., Golub I.I. *Nablyudayemost elektroenergeticheskikh sistem* [Observability of electric power systems]. Moscow, Science Publ., 1990. 200 p. (In Russian)
2. Gamm A.Z., Makarov A.L., Saneev B.G. et al. *Teoreticheskiye osnovy sistemnykh issledovaniy v energetike* [Theoretical foundations of systemic research in the energy sector]. Novosibirsk, Science Publ., 1971, 334 p. (In Russian)
3. Askaeva E.S. The influence of weighting coefficients of measurements on the results of assessing the state of electric power networks. *Elektroenergetika glazami molodezhi-2019: materialy yubileynoy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electricity through the eyes of youth-2019: materials of the jubilee X International Scientific and Technical Conference], 2019, pp. 188-192. (In Russian)
4. Kolosok I.N., Tikhonov A.V. Modeling of modern FACTS devices in assessing the state of a fragment of a 500 kV network of the Siberian Energy System. *Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh system energetiki: materialy 90-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. Yu.N. Rudenko* [Methodological issues of researching the reliability of large energy systems: Materials of the 90th meeting of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko], 2018, pp. 209-218. (In Russian)
5. Kolosok I.N., Gurina L.A. Improving the cybersecurity of smart energy systems using state assessment methods. *Voprosy kiber bezopasnosti* [Cyber security issues], 2018, no. 3(27), pp. 63-69. (In Russian)
6. Domyshev A.V. ESS assessment using deep learning. *Prikladnyye zadachi matematiki: materialy XXVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Applied problems of mathematics: Materials of the XXVI international scientific and technical conference], 2018, pp. 183-184. (In Russian)
7. Bartolomey P.I., Semenenko S.I. Development of a state assessment method for the integration of SVI and SCADA measurements in EPS. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Energy Issues], 2019, no. 3(4), pp. 77-88. (In Russian)
8. Semenenko S.I. *Razrabotka algoritmov razmeshcheniya sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy dlya povysheniya effektivnosti otsenivaniya sostoyaniya EES*. Kand. Diss. [Development of algorithms for placing synchronized vector measurements to increase the efficiency of assessing the state of electric power networks. Ph.D. Diss.]. Yekaterinburg, 2019.
9. Polyakov I.D. *Adaptatsiya metodov otsenivaniya sostoyaniya dlya modeley raspredelitelnykh setey* [Adaptation of state assessment methods for distribution network models]. Yekaterinburg, 2019. (In Russian)
10. Boloev E.V., Golub I.I. Methods of linear and nonlinear estimation of distribution network status. *Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistemen ergetiki: materialy 90-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. Yu.N. Rudenko* [Methodological issues of researching the reliability of large energy systems: Materials of the 90th meeting of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko], 2018, pp. 361-371. (In Russian)
11. Abiri E., Rashidi F. Optimal phasor measurement units placement to maintain network observability // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, no. 28, pp. 477-483.
12. Hussein, H.I. State Estimation via Phasor Measurement Units for Iraqi National Super Grid Power System Network// Electrical and Electronic Engineering, 2016, no. 1, pp. 12-22.
13. Tao Jin, Fuliang Chu, Cong Ling, Daniel Legrand Mon Nzongo A Robust WLS Power System State Estimation Method Integrating a Wide-Area Measurement System and SCADA Technology // Copyright of Energies, 2015, no. 8, pp. 2769-2787.
14. Korres G.N., Katsikas P.J. Reduced model for numerical observability analysis in generalised state estimation // Generation, Transmission and Distribution, 2015, no. 1, pp. 99-108.

Малафеев А.В., Бакайкина О.А. Кластерный анализ электрических сетей территориальных сетевых организаций на основе наблюдаемости их элементов в нормальном режиме // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 30-34. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-30-34

Malafeev A.V., Bakaykina O.A. Cluster Analysis of Distribution Grid Company Electric Networks Based on the Observation of Their Elements in Normal Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 30-34. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-30-34

УДК 621.311 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-35-41

Богачков И.М.[1], Хамитов Р.Н.[2], Валиев М.К.[3]

[1] ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал, г. Тюмень
[2] Омский государственный технический университет
[3] ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр», г. Тюмень

Пути выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений

В настоящее время большинство газовых месторождений Западной Сибири находится на завершающей стадии разработки. Расчетная электрическая нагрузка одного куста газовых скважин в период нарастающей и постоянной добычи газа составляет 100 кВт. Для продления рентабельной добычи газа на завершающей стадии применяются энергоемкие технологии, например технология распределенного компримирования газа с установкой на кустах газовых скважин мобильных компрессорных установок (МКУ) с электроприводом мощностью 1000 кВт. В результате электрическая нагрузка на газовом месторождении возрастает многократно, что приводит к необходимости строительства новых линий электропередачи. Например, на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении требуется построить 480 км высоковольтных линий класса напряжения 10 кВ для подключения МКУ. На данный момент проектирование системы электроснабжения газовых месторождений и выбор класса напряжения выполняются как для сетевой организации региона и не учитывается особенность газовых месторождений – многократный рост электрической нагрузки в течение всего жизненного цикла месторождения (в среднем он составляет 60 лет). Таким образом, главной проблемой электроэнергетики газовой промышленности является выбор оптимального класса напряжения системы электроснабжения с учетом всего жизненного цикла месторождения. Цель исследования – выбрать подход для разработки нового способа выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений. Для достижения поставленной цели в работе выполнен анализ существующих способов выбора класса напряжения системы электроснабжения. В результате анализа установлено, что для разработки нового способа выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений наиболее близким является подход с использованием теории планирования эксперимента, с учетом следующих факторов, характерных для газовой промышленности: количество установок комплексной подготовки газа на месторождении; коэффициент прироста электрической нагрузки; коэффициент распределения нагрузки по линии электропередачи; расстояние от источника до потребителя. Для достижения поставленной цели в работе используется экспериментально-теоретический метод (анализ и синтез).

Ключевые слова: класс напряжения, система электроснабжения, линия электропередачи, теория планирования эксперимента, целевая функция, дисконтируемые затраты.

Введение

Основное требование, предъявляемое к системе электроснабжения потребителей, – обеспечение беспрерывности (надежности) питания и соответствующего качества напряжения.

В связи с этим при разработке системы электроснабжения газовых месторождений, помимо расчета электрических нагрузок и выбора мощности трансформаторов, выполняется выбор класса напряжения системы электроснабжения, к которой относятся питающие и распределительные сети.

Выбор класса напряжения является одним из основных параметров оптимизации системы электроснабжения и определяет технические параметры трансформаторных подстанций, линий электропередачи, а следовательно, размер капиталовложений, эксплуатационных затрат, а также возможность дальнейшего развития месторождения при росте электрических нагрузок [1, 2].

На сегодняшний день способы выбора оптимального класса напряжения для системы электроснабжения газовых месторождений с учетом прогнозируемого роста электрических нагрузок в процессе всего жизненного цикла отсутствуют.

Теория

Согласно СТО Газпром НТП 1.8-001-2004 [3], при проектировании системы электроснабжения новых газовых месторождений для распределения электроэнергии по площадкам объектов рекомендуется применять класс напряжения 10 кВ. Выбор класса напряжения 6 кВ должен в каждом отдельном случае быть обоснован технико-экономическим расчетом.

На газовых месторождениях в системе электроснабжения для питающих сетей, как правило, используется средний и высокий класс напряжения – 6, 10, 35, 110 кВ, в распределительных сетях – 6 и 10 кВ. Широкое распространение находят схемы электроснабжения с применением глубоких вводов 20–110 кВ. Для питания и распределения электрической энергии промышленных предприятий и населенных пунктов все больше приобретает популярность класс напряжения 20 кВ.

Системы электроснабжения с классом напряжения 20 кВ реализованы в г. Москве (объекты «Москва-Сити» и «Ходынское поле» [4-6]), на объектах ПАО «Новатэк» (Харбейское нефтегазовое месторождение), а также в системе электроснабжения объектов добычи на объектах ПАО «Газпром».

В работе [7] сделан вывод, что при проектировании новых и реконструкции существующих сетей целесообразно применять класс напряжения 20 кВ в сравнении с 6 и 10 кВ, так как габариты и тип оборудования для указанных классов напряжения сопоставимы. При этом при переводе класса напряжения участка распределительных сетей с 6(10) на 20 кВ снижаются потери электроэнергии (потери напряжения) при одновременном снижении загруженности линий электропередачи [8].

В работе [9] рассмотрен ряд решений, увеличивающих пропускную способность питающей линии электропередачи центрального пункта сбора нефти Уренгойского месторождения путем перевода класса напряжения с 6 на 20 кВ.

В статье [10] выполнен технико-экономический анализ вариантов электроснабжения объектов добычи Харбейского нефтегазового месторождения с применением классов напряжения 10, 20 и 35 кВ. По результатам технико-экономического сравнения принят вариант сети с классом напряжения 20 кВ.

В статье [11] отмечается, что существующие системы электроснабжения с классом напряжения 6(10) кВ ставят технический предел использования при росте электрических нагрузок. Использование напряжения 20 кВ в распределительных сетях позволяет не только уменьшить потери в линиях, но и увеличить радиус обслуживания подстанций, кроме того, оно ведет к сокращению числа трансформаций.

Таким образом, выбор класса напряжения питающей и распределительной сети – комплексная задача, требующая учета многих факторов, меняющихся с течением времени.

Вопрос выбора оптимального класса напряжения для промышленных предприятий изучали: проф., д.т.н. Федоров А.А., проф., д.т.н. Мельников Н.А., проф., д.т.н. Константинов Б.А., к.т.н. Солдаткина Л.А., к.т.н. Дехкан А.Р., проф., д.т.н. Черепанов В.В., к.т.н. Суворова И.А. и др.

Однако газовые месторождения существенно отличаются от промышленных предприятий. В качестве примера на **рис. 1**. и **2** приведены ситуационные планы и технические параметры Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения и ООО «Тобольск-Нефтехим». Ситуационные планы представлены в одном масштабе.

Рис. 1. Ситуационный план газового месторождения Медвежьего

Рис. 2. Ситуационный план промышленного предприятия ООО «Тобольск-Нефтехим»

При сравнивании Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения с промышленным предприятием необходимо отметить следующие различия:

1. Площадь газового месторождения в $2{,}25\cdot10^{2}$ раза больше, чем у промышленного предприятия.

2. Плотность электрической нагрузки в $2{,}5\cdot10^{-4}$ раза меньше, чем у промышленного предприятия.

3. Питающая сеть системы электроснабжения газовых месторождений – «двойная сквозная магистраль с односторонним питанием», а у промышленного предприятия – «радиальная».

По электрической мощности газовые месторождения относятся к малым (месторождение состоит из одной установки комплексной подготовки газа (УКПГ)), средним (месторождение состоит из пяти УКПГ) и большим (месторождение состоит из пятнадцати УКПГ) промышленным предприятиям.

Сравнение схем электроснабжения промышленных предприятий разных классов напряжения показало следующее:

- для предприятий малой мощности при напряжении питающей сети 6, 10 кВ капитальные затраты на электросетевое строительство меньше, но имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При повышении напряжения снижаются потери электроэнергии, появляется возможность увеличения мощности предприятия;
- для предприятий средней мощности при напряжении питающей сети капитальные затраты на электросетевое строительство, как правило, сопоставимы с капитальными затратами для большего класса напряжения (20 кВ), но имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При повышении напряжения потери электроэнергии снижаются так же, как и для малых предприятий, появляется возможность увеличения мощности предприятия и ее передачи на большие расстояния при допустимом уровне потерь;
- для предприятий большой мощности при меньшем значении номинального напряжения капитальные затраты оказываются значительными, имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При переходе на более высокий класс напряжения капитальные и эксплуатационные затраты снижаются.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ

Существующие способы выбора класса напряжения для промышленных предприятий классифицируются на три категории согласно **рис. 3**.

В зарубежной практике проектирования систем электроснабжения используются следующие эмпирические формулы определения оптимального напряжения [13].

Рис. 3. Способы выбора класса напряжения

Инженером Вейкертом предложено определять нестандартное напряжение (кВ) по выражению

$$U = 3\sqrt{S} + 0,5l, \tag{1}$$

где S – передаваемая мощность, МВ·А; l – расстояние от источника до потребителя, км.

По справочникам шведских инженеров нестандартное напряжение (кВ) определяется выражением

$$U = 17\sqrt{\frac{l}{16} + P}, \tag{2}$$

где P – активная передаваемая мощность, МВт.

В период СССР Залесским А.М. была предложена следующая формула:

$$U = \sqrt{P(0,1 + 0,15\sqrt{l})}. \tag{3}$$

Формулу Залесского А.М. используют для линий электропередачи большой мощности с длинами порядка 1000 км.

Таким образом, анализируя выражения (1)–(3), необходимо отметить их недостатки:

- применение этих формул ограничено определенными значениями передаваемой мощности и длины линии электропередачи;
- они определяют лишь ориентировочное значение номинального напряжения и не учитывают ряд других факторов (например, потери электроэнергии, капительные вложения – CAPEX, эксплуатационные затраты – OPEX, дисконтируемые затраты), влияющих на класс напряжения, кроме длины и мощности;
- они справедливы только для радиальных схем, но не для магистральных с подключением нагрузки по линии.

Необходимо отметить, что схемы электроснабжения не могут быть одинаковыми при напряжениях 6, 10, 20, 35, 110 кВ, поэтому любые решения по выбору класса напряжения, принятые по эмпирическим формулам, могут дать общую ориентировку, а окончательно выбор оптимального значения напряжения выполняется на основе анализа всей системы электроснабжения.

В связи с этим вопрос выбора оптимального значения напряжения решается комплексно путем технико-экономического сравнения вариантов для схем электроснабжения при различных сочетаниях напряжений. В то же время при равенстве или даже небольших преимуществах низшего из сравниваемых напряжений следует принимать более высокое напряжение как перспективное с точки зрения дальнейшего развития предприятия, промысла и увеличения потребляемой мощности.

Повышение класса напряжения позволяет при одинаковой мощности увеличить радиус линии электропередачи, а при одинаковом расстоянии – и передаваемую мощность, при допустимом уровне потерь, при сопоставимых значениях удельной стоимости капитального строительства электросетевых объектов. Например, в Индии выбор класса напряжения осуществляется с учетом капитальных вложений на строительство высоковольтных линий [14].

Из этих соображений выбор класса напряжения в системах электроснабжения газовых месторождений должен быть экономически обоснован.

Аналитические методы

Методика нахождения оптимальных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий с учетом экономического обоснования основана на использовании интерполяционных формул Ньютона [13]:

$$\begin{aligned} З(U) &= З_1 + A_1(U - U_1) + \\ &+ B_1(U - U_1)(U - U_2) + \\ &+ C_1(U - U_1)(U - U_2)(U - U_3) + \ldots + \\ &+ N_1(U - U_1)(U - U_2)(U - U_3)\ldots(U - U_n) \end{aligned} \tag{4}$$

и Лагранжа [15]:

$$\begin{aligned} &З(U) = З_1\frac{A_1}{B_1} + З_2\frac{A_2}{B_2} + З_n\frac{A_n}{B_n}; \\ &A_1 = (U - U_2)(U - U_3)(U - U_4)\ldots(U - U_n); \\ &B_1 = (U_1 - U_2)(U_1 - U_3)(U_1 - U_4)\ldots(U_1 - U_n); \\ &A_2 = (U - U_1)(U - U_3)(U - U_4)\ldots(U - U_n); \\ &B_2 = (U_2 - U_1)(U_2 - U_3)(U_2 - U_4)\ldots(U_2 - U_n); \\ &A_n = (U - U_1)(U - U_2)(U - U_3)\ldots(U - U_{n-1}); \\ &B_n = (U_n - U_1)(U_n - U_2)(U_n - U_3)\ldots(U_1 - U_{n-1}). \end{aligned} \tag{5}$$

где U_i, $З_i$ – класс напряжения и приведенные затраты, соответствующие этому классу напряжению; i = 1, 2, 3,…,n.

Функция З(U) при использовании интерполяционных формул Ньютона и Лагранжа учитывает все существенные факторы, влияющие на выбор оптимального значения напряжения сети.

Основным недостатком интерполяционной методики является значительная трудоемкость расчетов приведенных затрат, в особенности при учете динамики развития газового месторождения.

Многочисленные расчеты, проведенные по этим формулам для определения класса напряжения в системах электроснабжения различных промышленных предприятиях, показывают, что даже при выполнении расчета без учета роста электрических нагрузок требуется выполнение расчета большого числа технико-экономических показателей систем электроснабжения по каждому классу напряжения.

Существует способ выбора класса напряжения по построенным математическим моделям прогноза электропотребления с учетом стоимости электроэнергии, который описан в работе [16].

Иранскими инженерами [17] предложен выбор оптимального класса напряжения с использованием генетического алгоритма с учетом стоимости потерь электроэнергии. Главный недостаток этого способа в том, что он применим только к промышленным предприятиям и не учитывает специфику газовых месторождений.

МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Большую перспективу при решении задач оптимизации сложных систем электроснабжения открывает применение объединенной математической теории, включающей, например, теорию подобия, теорию моделирования и теорию эксперимента [18]. Любая математическая модель связана с формализацией изучаемого объекта и представляет собой в большей или меньшей степени его идеализацию.

В работе [19] рассмотрено нахождение оптимальных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий на основе использования приемов, разработанных в математической теории планирования эксперимента:

$$\begin{gathered}U_{\text{опт}} = 21,5 + 9,90x_1 + 8,20x_2 + 3,70x_3 + \\ +1,58x_4 + 6,60x_1x_2 + 2,30x_1x_3 + \\ +0,98x_1x_4 + 2,0x_2x_3 + 0,89x_2x_4,\end{gathered} \tag{6}$$

где x_1 – мощность предприятия ($S_п$, кВ А); x_2 – расстояние от источника до потребителя (l, км); x_3 – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии (C_0, руб./(кВт·год)); x_4 – число часов работы предприятия в год ($T_р$, ч).

Полученное выражение представляет собой полиномную зависимость оптимального класса напряжения от существенно влияющих факторов. Эту математическую зависимость (адекватную модель) можно рассматривать как инструмент исследования системы электроснабжения.

В работе [20] рассмотрен вопрос выбора класса напряжения в системах внутризаводского электроснабжения, рациональное построение которых закладывает фундамент нормального функционирования предприятия. Выбор величины напряжения тесно связан с выбором схемы внутризаводского электроснабжения. Поэтому в работе [20] были получены математические модели для наиболее характерных схем распределения электрической энергии.

Модель радиальной одноступенчатой схемы имеет вид:

$$\begin{gathered}U_{\text{опт}} = 7,59 + 0,74x_1 + 1,21x_2 + 0,27x_3 - \\ -1,18x_4 + 0,61x_1x_2 + 0,22x_2x_3 + 0,20x_2x_4.\end{gathered} \tag{7}$$

Модель для магистральной схемы следующая:

$$\begin{gathered}U_{\text{опт}} = 8,07 + 0,92x_1 + 1,45x_2 + 0,37x_3 - \\ -1,33x_4 - 0,14x_5 + 0,67x_1x_2 + 0,20x_1x_3 + \\ +0,24x_2x_3 + 0,29x_2x_4 + 0,26x_1x_2x_4,\end{gathered} \tag{8}$$

где x_1 – суммарная нагрузка предприятия ($S_{сум}$, кВА); x_2 – средняя длина линии ($L_{ср}$, км); x_3 – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии (γ, руб/(кВт·год)); x_4 – отношение нагрузки потребителей 6 кВ ко всей нагрузке предприятия (β, %); x_5 – отношение числа часов работы предприятия в году $T_г$ к числу часов использования максимума нагрузки $T_м$ (α).

Методике определения рационального напряжения в цеховых сетях до 1000 В посвящена работа [21].

Модель внутрицехового электроснабжения представляется как сложная кибернетическая система, внутреннее строение которой неизвестно, но имеется возможность наблюдать входы и выходы этой системы [21]. Входы системы – это факторы, выходом системы является величина рационального напряжения $U_р$, определенная по минимуму приведенных затрат. В работе получены математические модели величины рационального напряжения для наиболее характерных схем распределения электроэнергии в цехе.

Для радиальной схемы

$$\begin{gathered}U_{\text{опт}} = 665 + 37x_1 + 64x_2 + 28x_3 - \\ -10,6x_1x_2 + 16,9x_1x_3 - 20,7x_1x_2x_3.\end{gathered} \tag{9}$$

Для магистральной схемы

$$\begin{gathered}U_{\text{опт}} = 520 + 29x_1 + 43x_2 + 27x_3 - \\ -20x_4 - 5,9x_1x_2 + 6,8x_2x_3x_4,\end{gathered} \tag{10}$$

где $x_1 = F$ – длина линии, км; $x_2 = P_у$ – установленная мощность, кВт; $x_3 = P_{ср}$ – расчетная мощность, кВт; x_4 = γ – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии руб./(кВт·год).

Методам выбора оптимального класса напряжения для систем электроснабжения промышленных предприятий с использованием объединенной математической теории посвящены работы проф., д.т.н. Федорова А.А. и проф., д.т.н. Мельникова Н.А., однако они рассматривали эту задачу с точки зрения оптимизации системы электроснабжения путем минимизации приведенных затрат промышленных предприятий.

Эти методы не применимы к системе электроснабжения газовых месторождений по следующим причинам:

- в настоящее время для выполнения технико-экономических расчетов используют дисконтируемые затраты, которые позволяют учитывать капитальные вложения и изменение стоимости электроэнергии, амортизационных отчислений по годам с учетом инфляции;
- газовые месторождения отличаются от промышленных предприятий протяженными линиями электропередачи (площадь на два порядка больше у газовых месторождений по сравнению с промышленными предприятиями) с небольшими электрическими нагрузками (плотность электрической нагрузки у газовых месторождений на четыре порядка меньше, чем у промышленных предприятий), которые кратно растут в процессе жизненного цикла месторождения [22].

В работе [23] разработана методика выбора номинального напряжения сети с использованием линеаризации дисконтируемых затрат на элементы системы электроснабжения.

Недостатком данного способа являются необходимость построения для каждой схемы электроснабжения математической модели дисконтируемых затрат для классов напряжения 10, 20 и 35 кВ и последующий выбор оптимального класса напряжения по минимальным дисконтируемым затратам.

Таким образом, на основании результатов анализа существующих методик определения оптимального класса напряжении выявлено, что методики выбора оптимального класса напряжения для системы электроснабжения, учитывающей особенности газовых месторождений, не существует.

Расчеты, связанные с выбором оптимального значения напряжения, должны выполняться с учетом обеспечения минимума дисконтируемых затрат, включающих в себя капиталовложения и эксплуатационные расходы по объектам электросетевого строительства.

Разработку новой методики выбора оптимального класса напряжения необходимо выполнять с использованием теории планирования эксперимента и интерполяционной теории Лагранжа при учете следующих факторов:

- количество УКПГ на месторождении (от одного до пятнадцати УКПГ);
- коэффициент прироста электрической нагрузки (от 1 до 10 раз);
- коэффициент распределения нагрузки по линии электропередачи (равномерное распределение – 0,55 о.е. или в конце линии – 1 о.е.);
- расстояние от источника до потребителя (от 0,5 до 150 км).

В общем случае для выбора оптимального класса напряжения предварительно следует определить нестандартное напряжение при минимальных дисконтируемых затратах.

Заключение

1. В настоящее время для питания и распределения электрической энергии промышленных предприятий широкое распространение находит класс напряжения 20 кВ, так как по объемам и удельным капитальным затратам данный класс напряжения сопоставим с 6 и 10 кВ при возможности передачи большей мощности и увеличения расстояния между источником и потребителями.

2. Существующие методы по выбору класса напряжения разделяются на три категории: эмпирический, аналитический и подход с применением теории планирования эксперимента.

3. Существующие способы расчета класса напряжения учитывают в основном два фактора – мощность нагрузки в конце линии и длину линии электропередачи.

Существующие и используемые для расчетов целевые функции определения класса напряжения системы внутреннего электроснабжения основаны на расчете минимума приведенных затрат без учета инфляции и перспективного увеличения электрической нагрузки потребителей.

Список литературы

1. Федоров А.А. Научные основы расчета и выбора важнейших параметров системы электроснабжения промышленных предприятий: автореф. дис. … д-ра техн. наук / Федоров Алексей Александрович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1972. 52 с.
2. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
3. СТО Газпром НТП 1.8-001-2004. Нормы технологического проектирования объектов газодобывающих предприятий и станций подземного хранения газа ООО «ВНИПИгаздобыча». М., 2004. 105 с.
4. Перспективы применения напряжения 20 кВ в Москве. URL: http://ieport.ru/stat/35822-nashe-setevoe-zavtra.html.
5. Буре И.Г., Гусев А.В. Повышение напряжения до 20-25 кВ и качество электроэнергии в распределительных сетях // МЭИ Электро. 2005. №5. С. 30-32.
6. Буре И.Г., Хевсуриани И.М. Предпосылки повышения напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий до 20 кВ // Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение: материалы науч.-тех. конф., 24-28 мая 2004 г. Ижевск: ИГТУ, 2004. С. 30-34.
7. Исследование режимов электрических сетей при переводе на напряжение 20 кВ, международная научно-практическая конференция / В.А. Агеев, К.А. Душутин, Е.Н. Еремеев, Г.Н. Семенов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Международной научно-практической конференции: Саранск, 2019. С. 226-230.
8. Оптимизация режимов электрических сетей по напряжению и коэффициентам трансформации регулируемых трансформаторов с применением генетического алгоритма / В.А. Агеев, Д.С. Репьев, П.А. Волгушев, А.И. Бурнаев, Д.В. Пяткин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Международной научно-практической конференции: Саранск, 2019. С. 139-146.
9. Питающие линии 6 кВ нефтегазоконденсатных месторождений. Увеличение пропускной способности / А.А. Володько, Д.Г. Лапаев, И.М. Богачков, П.А. Овчинников // Новости электротехники. 2015. №1(91). URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2015/91/08.php.
10. Богачков И.М. , Новикова М.В. 20 кВ – Оптимальное решение для электроснабжения нефтегазовых месторождений // Проблемы развития газовой промышленности: сборник тезисов докладов XX науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов / ООО «Газпром проектирование»; гл. ред. д-р техн. наук В.Н. Маслов. Тюмень, 2018. С. 123-126.
11. Необходимость применения напряжения 20 кВ в распределительных сетях предприятий и городов / А.А. Фёдоров, В.В. Каменева, А.И. Чернусский, Стебунова Е.Д., Сидоров С.Т. // Электричество. 1980. №8. С. 58-59.
12. Мельников, Н.А. Электрические сети и системы. М.: Энергия, 1975. 464 с.
13. Федоров А.А. Теоретические основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1976. 271 с.
14. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system / Akhlaque A.K., Ahmad F.M. / International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), vol. 2, issue 2, 2012, pp. 73-79.
15. Федоров А.А. Выбор рациональных напряжений для системы электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 1959. №9. С. 7-10.
16. Устюгов Н.В. Оптимизация класса напряжения предприятия с учетом прогноза электропотребления // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ. 2020. Т. 2. С. 23-26.
17. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA/ S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi / Energy Conversion and Management, 49, 2008. Pp. 1119-1125.
18. Веников В.А. Моделирование энергетических систем // Электричество. №1. 1971. С. 5-16.
19. Киреева Э.А. Исследования, выбор и оптимизация основных параметров системы электроснабжения промышленных предприятий: автореф. дис. … канд. техн. наук / Киреева Эльвира Александровна; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1971. 28 с.
20. Карпов В.М. Методика выбора рациональных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий на основе планирования эксперимента: автореф. дис. … канд. техн. наук / Карпов Валерий Михайлович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1976. 19 с.

21. Мерзликин А.И. Исследование и выбор уровня рационального напряжения в цеховых электрических сетях до 1000 В: автореф. дис. … канд. техн. наук / Мерзликин Александр Иванович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1978. 20 с.
22. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В.З. Минликаев, Д.В. Дикамов, О.В. Арно, А.В. Меркулов, С.А. Кирсанов, А.В. Красовский, С.Ю. Свенский, А.В. Кононов // Газовая промышленность. №1(717). 2015. С. 15-17.
23. Черепанов В.В., Суворова И.А. Линеаризация затрат на элементы системы электроснабжения при выборе номинального напряжения электрической сети // Научно-методологические проблемы и новые технологии образования. №6(48). 2012. С. 53-55.

Поступила в редакцию 12 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THE CHOICE OF THE OPTIMAL VOLTAGE CLASS OF GAS FIELD ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM

Ivan M. Bogachkov

Chief Specialist, Electrical Department, LLC "Gazprom Engineering", Tyumen Branch, Tyumen, Russia. E-mail: Bogim83@mail.ru.

Rustam N. Khamitov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: apple_27@mail.ru.

Mustafa K. Valiev

Ph.D. (Engineering), Chief Specialist for Electrical Solutions, Department of Design and Project Examination, LLC “NOVATEK Scientific and technical center”, Tyumen, Russia. E-mail: mustafa.veliev@novatek.ru

Currently, most of the gas fields in Western Siberia are at the final stage of their development. The estimated electrical load of one gas well cluster during the period of growth and constant gas production is 100 kW. To extend the cost-effective gas production at the final stage, a number of energy-intensive technologies have been implemented, such as the one of distributed gas compression with the installation of mobile compressor units with electric drive of 1000 kW at gas wellheads. As a result, there is a multiple increase in the electrical load that leads to the necessity to build new overhead transmission lines. For example, to implement the MCU at the Yamburgskoe field, it is necessary to build an overhead transmission line of 10 kV with a length of 480 km. At the moment, engineering of electricity supply system for gas fields and the choice of the voltage class are performed similarly to the ones for the regional network organization and do not take into account the peculiarity of gas fields, that is a multiple increase in the electric load during the entire life cycle of the field (on average, it is about 60 years). Thus, the main problem of the gas industry electro energetics is the choice of the optimal voltage class electricity supply system, taking into account the entire life cycle of the field.

The goal of the study is to select an approach for developing a new method for choosing the optimal voltage class for the gas field electricity supply system. To achieve this goal, the paper analyzes the existing methods for choosing the voltage class of electricity supply system. The analysis found that for the development of a new method of choosing the optimal voltage class of a gas field electricity supply system the closest one is the approach that uses the theory of experiment planning, taking into account the following factors specific to the gas industry: the number of installations of gas complex preparation at the field; the coefficient of electric load increase; the coefficient of load distribution on transmission lines; the distance from the electricity source to the consumer. To achieve this goal, we used the experimental and theoretical method (analysis and synthesis).

Keywords: voltage class, external electricity supply system, power overhead transmission line, experiment planning theory, objective function, discounted costs.

REFERENCES

1. Fedorov A.A. *Nauchnie osnovy rascheta i vybora vazhneishikh parametrov sistemy elektrosnabzhenia promyshlennykh predprijati* [Scientific bases of calculation and selection of the most important parameters of electricity supply system of industrial enterprises]. Doctor’s thesis, Moscow, 1972, 52 p.
2. Fedorov A.A., Kameneva V.V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatiy* [Fundamentals of electricity supply of industrial enterprises], Moscow: Energoatomizdat, 1984. (In Russian)
3. Gazprom Standards NTP 1.8-001-2004. Norms of technological engineering of objects of gas - producing enterprises and underground gas storage stations of LLC VNIPIgazdobycha. M., 2004. (In Russian)
4. Prospects of application voltage of 20 kV in Moscow. Available at: http://ieport.ru/stat/35822-nashe-setevoe-zavtra.html. (In Russian)
5. Bure I.G., Gusev A.V. *Povyshenie napriazhenia do 20-25 kV i kachestvo elektrojenergii v raspredelitelnykh setiakh* [Increasing the voltage to 20-25 kV and the quality of electricity in distribution networks], in MEI Elektro, 2005, no.5, pp. 30-32.
6. Bure I.G., Khevsuriani I.G. Prerequisites for increasing voltage in distribution networks of industrial enterprises up to 20 kV. *Tezisy dokl. nauch.-tekhn. konf. “Elektrooborudovanie, elektrosnabzhenie, elektrosberezhenie”* [Scientific Conference Abstracts: Electrical equipment, power supply, power saving], Izhevsk, 2004, pp. 30-34. (In Russian)
7. Ageev V.A., Dushutin K.A., Eremeev E.N., Semenov G.N. Research of electric network modes when switching to 20 kV voltage. *Nauch.-pract. konf. “Energo effektivnie i resursosberegajushhie tekhnologii i sistemy”* [Research and practice conference: Energy-efficient and resource-saving technologies and systems], 2019, pp. 226-230. (In Russian)
8. Ageev V.A., Repyev D.S., Volgushev P.A., Burnaev A.I., Pyatkin D.V. Optimization of electric network modes by voltage and transformation coefficients of regulated transformers using a genetic algorithm. *Nauch.-pract. konf. “Energo effektivnie i resursosberegajushhie tekhnologii i sistemy”* [Research and practice conference: Energy-efficient and resource-saving technologies and systems], Saransk, 2019, pp. 139-146. (In Russian)

9. Volodko A.A., Lapaev D.G., Bogachkov I.M., Ovchinnikov P.A. 6 kV feeding lines of oil and gas condensate fields. Increase in throughput. *Novosti elektrotekhniki*, 2015, no. 3(91). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2015/91/08.php. (In Russian)
10. Bogachkov I.M., Novikova M.V. 20 kv optimal solution for power supply of oil and gas fields, *Tez.dokl. XX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Problemy razvitia gazovoi promyshlennosti"* [Development issues of gas production industry: collection of scientific conference abstracts XX research and practice conference of young scientists and specialists], Gazprom Proektirovanie LLC; under the editorship of D.Sc. Maslov, V. N. Tyumen, 2018, pp. 123-126. (In Russian)
11. Fedorov A.A., Kameneva V.V., Chernussky A.I., Stebunova E.D., Sidorov S.T. The need to use 20 kV voltage in distribution networks of enterprises and cities. *Elektrichestvo* [Electric power], 1980, no. 8, pp. 58-59. (In Russian)
12. Melnikov N.A. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electrical network and the system], Moscow: Energy, 1975. (In Russian)
13. Fedorov A.A. *Teoreticheskie osnovy elektrosnabzhenia promyshlennykh predpriyati* [Theoretical bases of power supply of industrial enterprises], Moscow: Energy, 1976. (In Russian)
14. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system / Akhlaque A.K., Ahmad F.M. / International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), vol. 2, Issue 2, 2012, pp. 73–79.
15. Fedorov A.A. Selection of rational voltages for the power supply system of industrial enterprises. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 1959, no. 9, pp. 7-10. (In Russian)
16. Ustyugov N.V. Optimization of the voltage class of an enterprise considering the forecast of power consumption. *Matematicheskie metody v tekhnike i tehnologiakh* [Mathematical methods in engineering and technology]. MMTT, 2020, vol. 2, pp. 23-26. (In Russian)
17. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA / S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi / Energy Conversion and Management 49, 2008, pp. 1119–1125.
18. Venikov V.A. Modeling of energy systems. *Elektrichestvo* [Electric power], 1971, no 1. (In Russian)
19. Kireeva E.A. *Issledovania, vybor i optimizatsia osnovnykh parametrov sistemy elektrosnabzhenia promyshlennykh predpriyati.* Kand.Diss. [Research, selection and optimization of the main parameters of electricity supply system for industrial enterprises. Ph. D. Diss.]. Moscow, 1971.
20. Karpov V.M. *Metodika vybora ratsionalnykh napryazheni v sistemakh elektrosnabzhenia promyshlennykh predpriyati na osnove planirovania eksperimenta*. Kand.Diss. [Method of selecting rational voltages in power supply systems of industrial enterprises based on experiment planning. Ph. D. Diss.]. Moscow, 1976.
21. Merzlikin A.I. *Issledovanie i vybor urovnya ratsionalnogo naprjazhenia v tsekhovykh elektricheskikh setiakh do 1000 V.* Kand.Diss. [Research and selection of the rational voltage level in electrical networks up to 1000 V. Ph.D.Diss.]. Moscow, 1978.
22. Minlikaev V.Z., Dikamov D.V., Arno O.V. Application of mobile compressor units at the final stage of development of gas fields. *Gazovaya promyshlennost* [Natural gas industry]. 2015, no. 1(717), 2015, pp. 15-17. (In Russian)
23. Cherepanov V.V., Suvorova I.A. [Linearization of costs for elements of electricity supply system while choosing the nominal voltage of the electric network. *Nauchno-metodologicheskie problemy i novye tekhnologii obrazovania* [Scientific and methodological issues and new technology in education]. 2012, no. 6(48), pp. 53-55. (In Russian)

Богачков И.М., Хамитов Р.Н., Валиев М.К. Пути выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 35-41. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-35-41

Bogachkov I.M., Khamitov R.N., Valiev M.K. The Choice of the Optimal Voltage Class of Gas Field Electricity Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 35-41. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-35-41

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 622.313.333 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48

Белоусов А.С., Мещеряков В.Н.

Липецкий государственный технический университет

СНИЖЕНИЕ ПУСКОВЫХ ТОКОВ И МОМЕНТОВ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ ЗАДЕРЖЕК ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Прямой пуск от сети любых асинхронных короткозамкнутых двигателей характеризуется возникновением пиковых бросков пусковых токов и слабозатухающих колебаний электромагнитного момента, что может приводить к просадкам напряжения, износу изоляции обмоток, ударам, биению, резонансным колебаниям механического оборудования. Данные слова справедливы не только для распространенных в промышленности трехфазных двигателей, но и для двухфазных и однофазных двигателей, частным случаем которых являются незаменимые в быту и вспомогательных системах маломощные конденсаторные двигатели. Двухфазные двигатели слабо распространены, но они являются регулируемым аналогом однофазных двигателей, а потому в дальнейшем могут заменить их во многих сферах применения. Другое возможное применение двухфазных двигателей – замена двигателей постоянного тока в тяговых приводах, применяемых в механическом оборудовании металлургической, горной промышленности, электротранспорте, то есть тех сферах, где электрические и механические нагрузки оказывают наиболее негативное влияние. Их снижение или устранение всегда будет являться актуальной научно-технической задачей. Целью статьи является определение возможности снижения пусковых токов и моментов двухфазного асинхронного двигателя за счет последовательности подачи напряжения на каждую обмотку статора. Для данной оценки разработана компьютерная модель прямого пуска двухфазного двигателя, проведены необходимые исследования и определены требования к очередности подключения к сети. Для исследования математической модели использовался пакет программ Matlab Simulink. Исследования показали, что задержка подключения к сети второй фазы двухфазного двигателя значительно снижает максимальные значения тока и момента и устраняет их начальные колебания. Однако, в отличие от трехфазных двигателей, решающее действие оказывает угол начального сдвига фаз, что накладывает дополнительное требование к рациональной системе прямого пуска двухфазных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: двухфазный асинхронный двигатель, однофазный двигатель, компьютерная модель, прямой пуск, колебания момента, пусковой ток, угол начального сдвига фаз, начальные значения напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы механического оборудования определяется надежностью работы их электроприводов. Большинство маломощных механизмов (деревообрабатывающие станки, бетономешалки, насосы, компрессоры) приводятся в движение с помощью нерегулируемых однофазных асинхронных двигателей посредством прямого пуска от однофазной сети [1, 2]. Стоит отметить, что большинство таких двигателей выпускаются типовыми сериями и устанавливаются на механизм только в соответствии с мощностными параметрами. Как следствие, их работа характеризуется существенной механической нагрузкой и инерционностью привода, возникают пиковые броски пусковых токов и слабозатухающие колебательные составляющие электромагнитного момента [3]. Все это приводит к просадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток двигателя, ударам, резонансным колебаниям [4]. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок за счет разработки схемных решений при прямом пуске однофазных двигателей является актуальной научно-технической задачей во всех сферах промышленности и области бытовой техники.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПРЯМОГО ПУСКА ОДНОФАЗНЫХ И ДВУХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье [4] подобные проблемы и пути их решения описывались для трехфазного асинхронного электропривода. Было установлено, что пиковые броски тока и момента и их последующие колебания при прямом пуске можно снизить путем подачи напряжения на каждую фазу двигателя с последовательными задержками. Цель данной работы – показать применимость данной концепции и к однофазным асинхронным двигателям.

Эта цель выглядит вполне достижимой, поскольку в подобных статьях, касающихся трехфазных АД, объектом исследования служили двухфазные динамические модели с некоторыми особенностями трехфазных машин [5-6]. Двухфазная же машина имеет подобную приведенную форму в чистом виде [7].

Известно, что однофазный двигатель не образует вращающегося магнитного поля, а значит, не имеет пускового момента [8]. Для возможности запуска в однофазный двигатель добавляют вторую пусковую обмотку, расположенную под углом 90° относительно рабочей. Чаще всего фазосмещающим элементом для подключения пусковой обмотки является конденсатор, потому такой двигатель называют конденсаторным [8]. После разгона пусковая обмотка может отключаться, а может продолжать работать. Асинхронный двигатель, у которого вторая обмотка питается независимо от первой, называют двухфазным (ДАД). Главное достоинство двухфазного двигателя по сравнению с однофазным – возможность регулирования скорости посредством изменения напряжения на обеих обмотках [9].

Конечно, в этом случае прямой пуск от однофазной сети невозможен, требуется преобразователь частоты, а значит, вместо двухфазного двигателя в тех же условиях может быть применен и трехфазный. Однако двухфазный будет иметь больший момент и меньшую скорость по сравнению с аналогичным трехфазным за счет размещения большего количества полюсов статора при тех же массо-габаритных параметрах [10].

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Объектом управления (двухфазным двигателем) математической модели выступает блок *Single Phase Asynchronous Machine* из библиотеки *SimPowerSystem* программы *Matlab Simulink*, работающий в режиме раздельного управления основной и вспомогательной обмотками. Его структурная схема показана на **рис. 1**.

Данная модель двигателя описана в [11], она имеет самые распространенные допущения: обмотки статора и ротора распределены по пазам равномерно и создают синусоидальные намагничивающие силы; зубцовые пульсации потока не учитываются; вихревые токи учтены в виде сопротивлений потерь в стали.

Структурная схема основана на разделении двух обмоток статора и ротора, составляющих четыре малых контура, и их взаимовлиянии. Напряжения статора U_a, U_b из двухфазной неподвижной системы координат *AB* пересчитываются в потокосцепления статора φ_{qs}, φ_{ds} в двухфазной вращающейся системе координат *dq*. Учитывая потокосцепления ротора φ'_{qr}, φ'_{dr} рассчитываются взаимные потокосцепления в системе координат *dq* φ_{mq}, φ_{md}. *q*-составляющая потокосцепления ротора φ'_{qr} определяется на основе взаимной *q*-составляющей потокосцепления с учетом влияния противолежащего потокосцепления ротора φ'_{dr}. Аналогично рассчитывается и потокосцепление φ'_{dr}. Блоки обратной связи в каждом из четырех малых контуров служат для расчета векторов ЭДС двух статорных и двух роторных обмоток. На основе рассчитанных потокосцеплений определяются токи статора и ротора в системе координат *dq*. На основе токов и потокосцеплений ротора рассчитывается электромагнитный момент ротора. На основании момента двигателя, момента нагрузки и момента инерции рассчитывается угловая скорость двигателя, которая учитывается и при расчете составляющих потокосцеплений ротора.

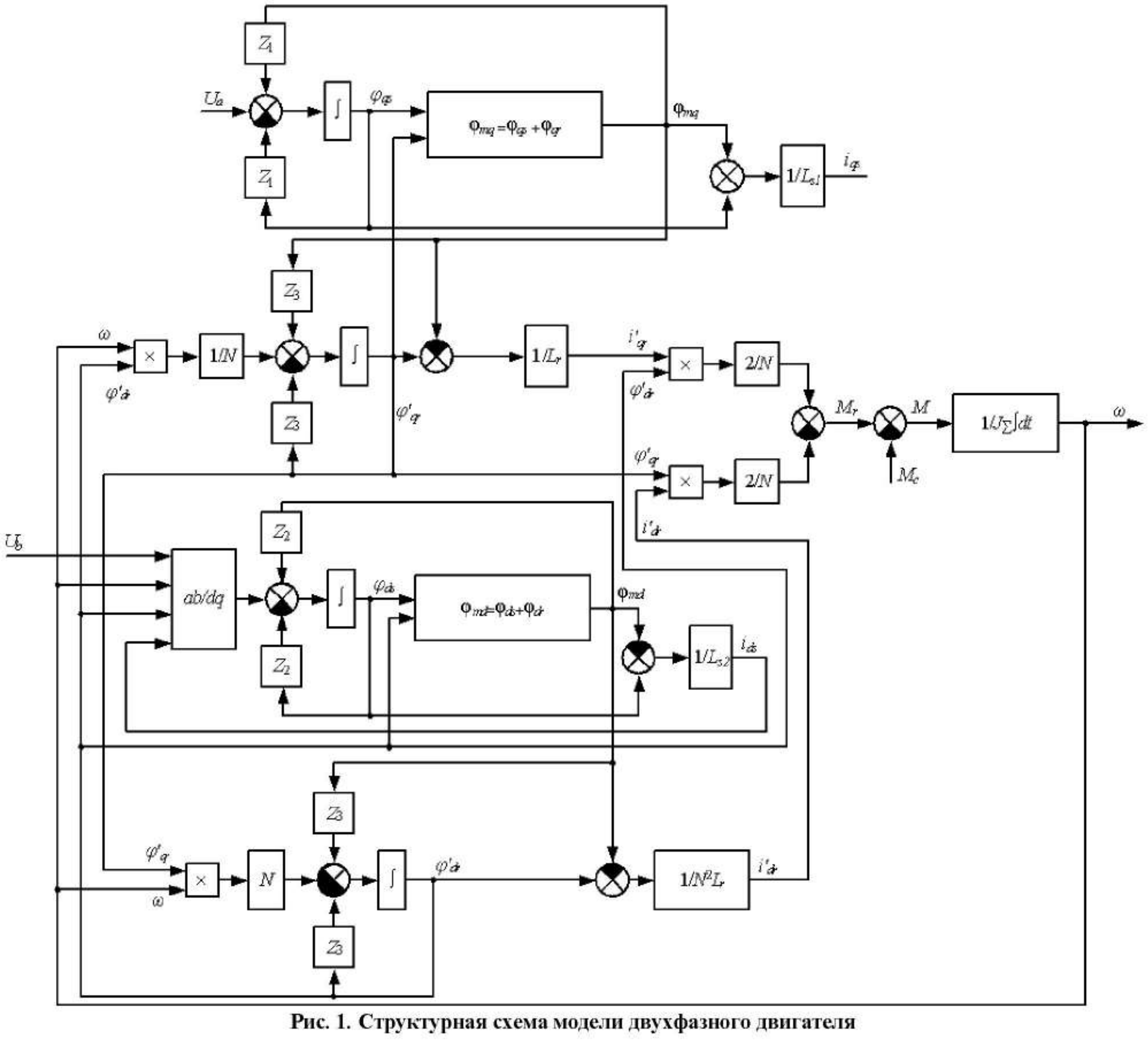


Рис. 1. Структурная схема модели двухфазного двигателя

Стандартный двигатель из библиотеки имеет параметры, соответствующие асимметричному однофазному двигателя с добавочной обмоткой. Однако в нашем эксперименте исследуется симметричный двухфазный двигатель, вследствие чего у двигателя из библиотеки были изменены несколько параметров в соответствии с **табл. 1**.

Как видно из таблицы, двигатель имеет нетипичные для РФ номинальную мощностью, измеряемую в лошадиных силах, и номинальную частоту 60 Гц. Данные параметры остаются неизмененными, поскольку нам для моделирования важно иметь номинальный режим работы двигателя. Модель прямого пуска двухфазного АД показана на **рис. 2**.

Основные параметры модели двухфазного асинхронного двигателя из библиотеки *SimPowerSystem*

Параметр	Значение
Номинальная мощность	0,25 л.с. (187 Вт)
Номинальное напряжение статора	110 В
Номинальная частота	60 Гц
Сопротивление первой обмотки статора	2,02 Ом
Индуктивность первой обмотки статора	7,4 мГн
Сопротивление второй обмотки статора	2,02 Ом
Индуктивность второй обмотки статора	7,4 мГн
Сопротивление обмотки ротора	4,12 Ом
Индуктивность обмотки ротора	5,6 мГн
Взаимная индуктивность обмоток	177,2 мГн
Момент инерции	0,0146 кг·м^2
Коэффициент трения	0
Число пар полюсов	2
Коэффициент соотношения обмоток статора	1

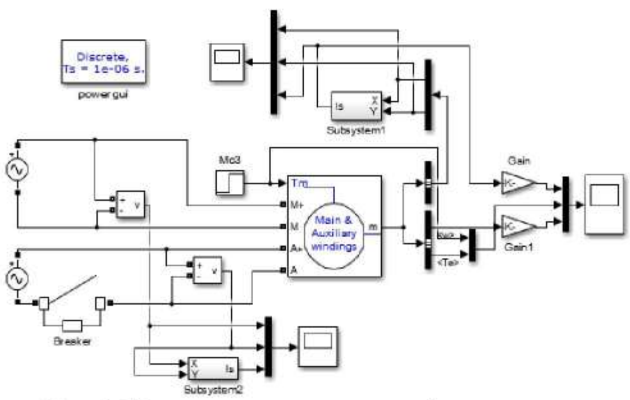


Рис. 2. Модель прямого пуска двухфазного двигателя

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПУСКА ДВУХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

На **рис. 3** показаны переходные процессы тока статора, момента и угловой скорости вращения при обычном прямом пуске под нагрузкой, рассчитанные с помощью компьютерной модели.

Данные кривые представлены в относительных единицах, при этом скорость в масштабе 10:1. Время прямого пуска составляет 0,7 с. На интервале времени от 0 до 0,25 с в кривых тока и момента выражены существенные, слабозатухающие колебания частотой до 60 Гц.

Графики двухфазного напряжения статора и его модуля, а также двухфазного тока и его модуля показаны на **рис. 4**.

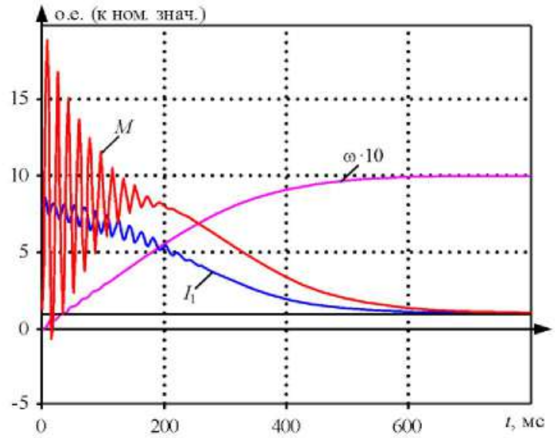


Рис. 3. Переходные процессы прямого пуска

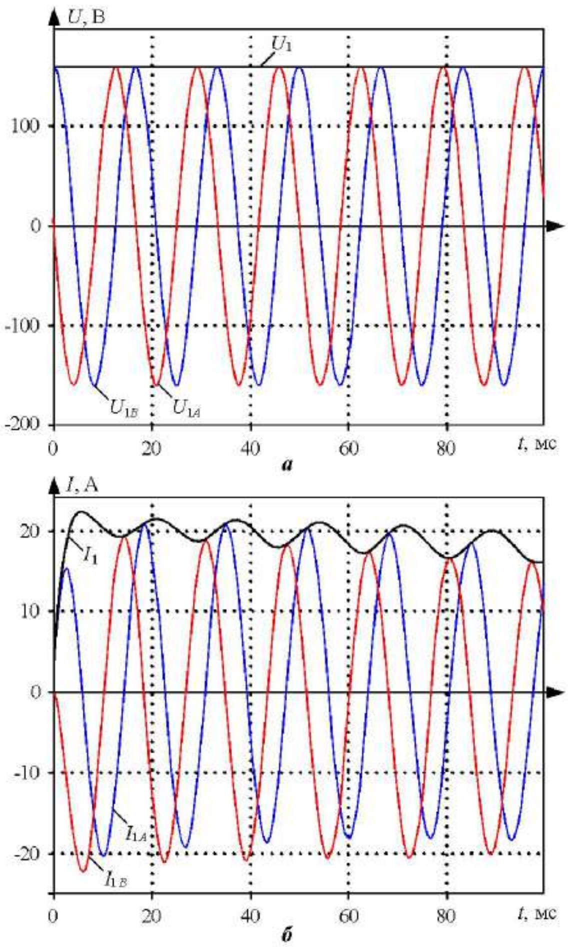


Рис. 4. Переходные процессы прямого пуска:
***а* – напряжения обмоток статора; *б* – токи статора**

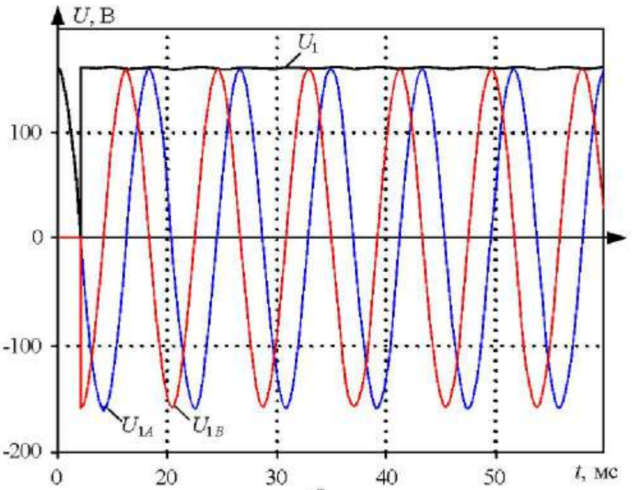
Наличие слабозатухающих колебаний на графиках переходных процессов объясняется разницей начальных значений фазных напряжений, изменяющихся по формуле (1) и при прямом пуске подаваемых на статорные обмотки одновременно [12].

$$\begin{cases} U_{1a}(t) = U_{1m}\cos(\omega t + \Delta\varphi); \\ U_{1b}(t) = U_{1m}\cos(\omega t + \Delta\varphi + \pi/2), \end{cases} \tag{1}$$

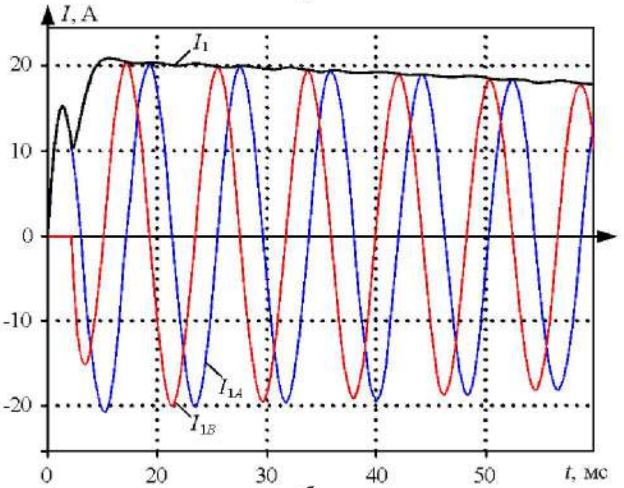
где $\Delta\varphi$ – начальный угол сдвига двух фаз питающего напряжения.

Исследование пуска с задержкой второй фазы

Согласно предыдущим исследованиям для исключения слабозатухающих свободных колебаний трехфазного двигателя при прямом пуске напряжения на обмотки *B* и *C* необходимо подавать с задержкой на 120 и 240 эл. град соответственно [4]. Проверим выполнение данного утверждения для двухфазного двигателя, для чего обеспечим задержку подачи напряжения на вторую обмотку *B* статора на 90 эл. град, то есть на 4,2 мс (при частоте двигателя и сети 60 Гц). Вид графиков напряжения и токов статора при задержке напряжения показан на **рис. 5**, кривые модуля тока статора, электромагнитного момента и угловой скорости приведены на **рис. 6**.



а



б

Рис. 5. Переходные процессы при пуске с задержкой

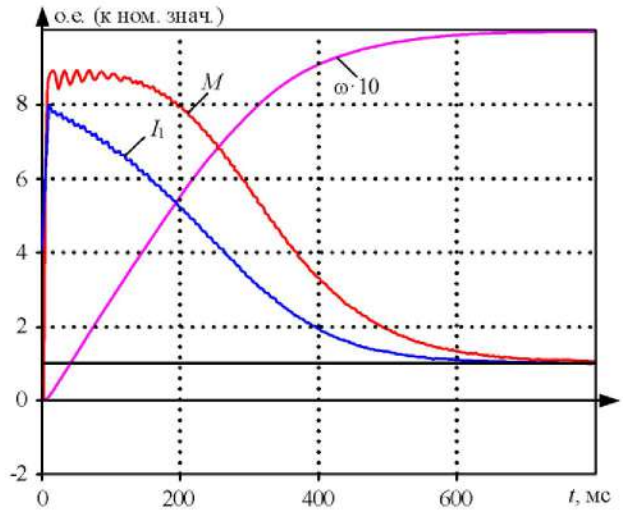


Рис. 6. Переходные процессы при пуске с задержкой подачи напряжения на вторую фазу

Время переходного процесса не изменилось и составляет примерно 700 мс. Максимумы тока и момента уменьшились до 8,00 и 8,95 о.е. соответственно. Однако время затухания колебаний тока и момента оказалось равно времени переходного процесса угловой скорости. Амплитуда этих колебаний невелика, она составляет около 0,02 о.е., потому ими можно пренебречь. В начале пуска на графике момента видны колебания другого рода, с амплитудой до 0,5 о.е. и временем затухания 110 мс. Именно они подлежат сравнению с колебаниями при прямом пуске без задержек, время затухания которых составляло 200 мс.

Исследование влияния угла сдвига фаз

Из формулы (1) видно, что в предыдущих моделях мы не учитывали угол сдвига фаз $\Delta\varphi$, являющийся начальным углом для каждой фазы по отношению к нулевым начальным условиям АД. На модели прямого пуска ДАД без задержки было установлено, что переходные процессы не зависят от угла сдвига $\Delta\varphi$, так же как и у трехфазного АД.

Для трехфазного двигателя известно, что ненулевой угол сдвига при задержанной подаче фазных напряжений влияет на качество переходных процессов пуска, однако их качество сохраняется [4]. Проверим данное утверждение для ДАД с задержкой. На **рис. 7** приведены переходные процессы при задержанной подаче напряжения и $\Delta\varphi = 90°$, по которым видно, что время переходных процессов и время затуханий колебания электромагнитного момента и тока стали такими же, как у прямого пуска без задержек, а максимумы тока и момента выросли до 9,13 и 22,7 о.е. соответственно.

На **рис. 8** и **9** представлены зависимости максимумов тока и момента соответственно от угла сдвига напряжений в начале пуска ДАД при задержке подачи напряжения на вторую фазу.

Приведенные зависимости тока и момента имеют явно выраженные минимумы $\Delta\varphi = -10°$ и $\Delta\varphi = 0°$ соответственно, при которых максимальные ток и момент будут равны 7,90 и 8,95 о.е. Максимальные значения тока и момента будут при $\Delta\varphi = 90°$ и составят 9,14 и 22,7 о.е.

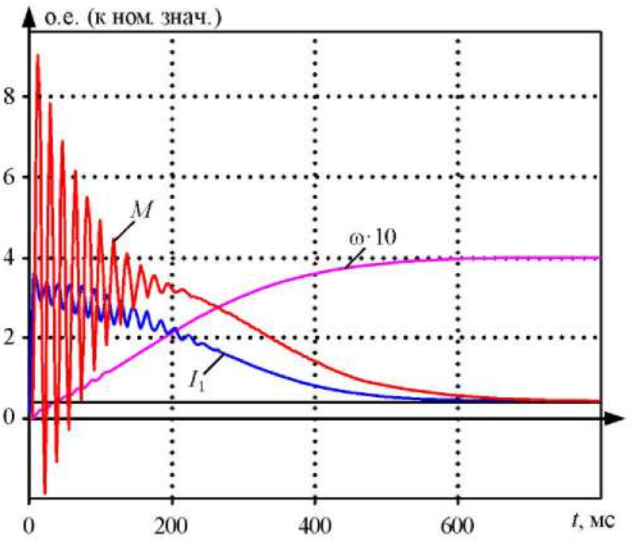


Рис. 7. Переходные процессы при пуске с задержкой подачи напряжения на вторую фазу

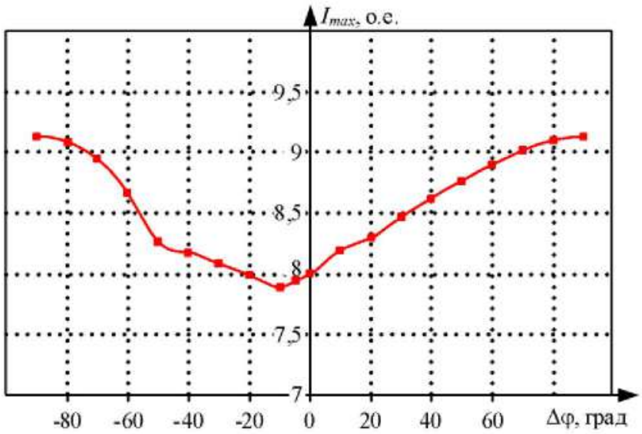


Рис. 8. Зависимость максимума тока от угла сдвига

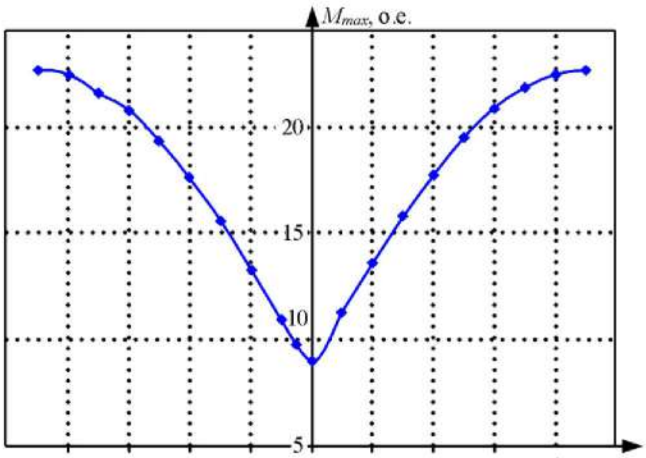


Рис. 9. Зависимость максимума момента от угла сдвига

Полученные зависимости показывают, что угол сдвига значительно влияет на максимальные значения тока и момента, а также на характер начальных колебаний момента, которые незначительны только при очень малом диапазоне значений угла сдвига. Установлено, что они минимальны при $\Delta\varphi = -1°$. Таким образом, при прямом пуске двухфазного АД с задержанной подачей напряжения на вторую фазу нежелательно регулировать максимумы тока и момента с помощью угла начального сдвига фаз. Данный способ пуска должен осуществляться с помощью устройства, точно определяющего текущую точку на синусоиде сетевого напряжения и коммутирующего первую фазу, а за ней и вторую в строго заданные моменты времени.

Выводы

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

1. Как и у трехфазного двигателя, в начале прямого пуска при одновременной подаче напряжения в кривых тока статора и электромагнитного момента двухфазного АД явно выражены слабозатухающие колебания с частотой, доходящей до частоты питающей сети, но амплитуда колебаний момента у двухфазного двигателя в относительных единицах значительно больше, чем у трехфазного.

2. При одновременной подаче двухфазного напряжения начальный угол сдвига напряжения статора не влияет на форму переходных процессов.

3. При задержке подачи напряжения на вторую фазу на 90 эл. град приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний момента в начале пуска, однако высокочастотные низкоамплитудные незатухающие колебания тока и момента продолжают действовать на всем протяжении переходного процесса, хотя и не оказывают влияние на переходные процессы скорости.

4. При задержке подачи напряжения на вторую фазу начальный угол сдвига фаз статора существенно влияет на максимумы модуля тока и электромагнитного момента. При этом диапазон угла сдвига, при котором колебания момента в начале пуска незначительны, минимален, и угол сдвига фаз не подлежит широкому регулированию.

5. Для осуществления описанного алгоритма сглаживания колебаний тока и момента при прямом пуске двухфазного двигателя необходимо устройство, определяющее текущее значение на синусоиде сетевого напряжения и коммутирующее первую фазу двухфазного двигателя точно в момент максимального значения действующего фазного напряжения, а вторую фазу – строго через 90 эл. град (при условии, что сетевые напряжения двух фаз сдвинуты на 90 эл. град относительно друг друга).

Заключение

Исследование, описанное в статье, показало, что путем задержки подачи напряжения на вторую фазу можно добиться снижения пульсаций электромагнитного момента и тока статора двухфазного двигателя при прямом пуске от сети. Подобным способом можно добиваться улучшения характеристик и однофазного двигателя с добавочной пусковой обмоткой. Однако для двухфазного двигателя требуется большая точность коммутации фазных цепей, обеспечить которую возможно при электронном управлении. Следующим шагом в данном исследовании видится создание устройства, осуществляющего данную коммутацию и смещение цепи питания второй фазы относительно первой.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Список литературы

1. Abdel-Rahim N., Shaltout A. Operation of single-phase induction motor as two-phase motor // IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON). 2002. Vol. 2. Pp. 967-972. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185403
2. Мешков А.С., Суздорф В.И. Статические и динамические характеристики системы стабилизации скорости однофазным коллекторным двигателем с нелинейной обратной связью // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №. 2. С. 139-143.
3. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2012. 482 p.
4. Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений / Е.Я. Омельченко, А.Б. Лымарь, В.О. Танич, М.Ю. Петушков // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 47-54. DOI 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54.
5. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. № 1. С. 24-28.
6. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3. С. 88-97. DOI 10.14529/power180311.
7. Kumsuwan Y., Srirattanawichaikul W., Premrudeepreechacharn S. Analysis of two-phase induction motor using dynamic model based on MATLAB/Simulink // Asian Journal on Energy and Environment. 2010. Vol. 11. No. 1. Pp. 48-59.
8. Диагностика конденсаторных однофазных асинхронных двигателей с учетом технологических и эксплуатационных факторов / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, О.А. Бойкова, Д.Ю. Пашали // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. № 34 (251) С. 28-34.
9. Hayakwong E., Kinnares V., Bunlaksanunusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE. 2016. Pp. 1-6.
10. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations / A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev, O.V. Kryukov // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE. 2019. Pp. 444-449. DOI 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487.
11. Collins E.R., Puttgen H.B., Sayle W.E. Single-phase induction motor adjustable speed drive: Direct phase angle control of the auxiliary winding supply // Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1988. Pp. 246-252. DOI 10.1109/IAS.1988.25070.
12. Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 49-61. DOI 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061.

Поступила в редакцию 26 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REDUCING THE VALUES OF INITIAL CURRENT AND TORQUES OF A TWO-PHASE INDUCTION MOTOR DUE TO DELAYS OF PHASE VOLTAGES

Aleksey S. Belousov

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: 011bas962@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9464-2260.

Viktor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0984-5133.

Direct start-up of any induction squirrel-cage motors is characterized by the occurrence of peak inrush currents and weakly damped oscillations of the electromagnetic torque, which can lead to voltage drops, deterioration of the winding insulation, shock, beating, resonant oscillations of mechanical equipment. These words are true not only for three-phase motors, which are common in the industry, but also for two-phase and single-phase motors, a special case of which are low-power capacitor motors that are indispensable in everyday life and in auxiliary systems. Two-phase motors are not widely used, but they are a controlled analogue of single-phase motors and therefore can subsequently replace them in many areas of application. Another possible application of two-phase motors is the replacement of DC motors in traction drives used in mechanical equipment of the metallurgical, mining, electric transport industries, that is, those areas where electrical and mechanical loads have the most negative impact. Their reduction or elimination will always be an urgent scientific and technical task. The purpose of the article is to determine the possibility of reducing the starting currents and moments of a two-phase asynchronous motor due to the sequence of voltage supply to each stator winding. To achieve this, a computer model of direct start-up of a two-phase motor was developed, the necessary studies were carried out and the requirements for the sequence of connection to the network were determined. To study the mathematical model, the Matlab Simulink software package was used. Studies have shown that a delay in connecting the second phase of a two-phase motor to the network significantly reduces the maximum current and torque values and eliminates their initial fluctuations. However, unlike three-phase motors, the angle of the initial phase displacement has a decisive effect, which imposes an additional requirement on a rational system of direct starting of two-phase asynchronous motors.

Keywords: two-phase asynchronous motor, single-phase motor, computer model, direct start, torque fluctuations, starting current, angle of initial phase shift.

REFERENCES

1. Abdel-Rahim N., Shaltout A. Operation of single-phase induction motor as two-phase motor. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, 2002, no. 2, pp. 967-972. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185403.
2. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Static and dynamic characteristics of the speed stabilization system with a single-phase collector motor with nonlinear feedback. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and technical bulletin of the Volga region], 2011, no. 2, pp. 139-143. (In Russian)
3. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models. United Kingdom, JohnWiley&Sons Ltd, 2012. 482 p.
4. Omelchenko E.Ya., Lymar A.B., Tanich V.O., Petushkov M.Yu. Reducing of value of starting current and moment of asynchronous motor with squirrel cage rotor using phase voltage sequence. *Elektroteknicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 47-54. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54. (In Russian)
5. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Asynchronous electric drive control system with forced slip reference. *Vestnik Lipetskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Lipetsk State Technical University], 2017, no. 1, pp. 24-28. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Danilov V.V. Limiting electromagnetic torque fluctuations of an induction motor with scalar control. *Vestnik Juzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 88-97. DOI: 10.14529/power180311. (In Russian)
7. Kumsuwan Y., Srirattanawichaikul W., Premrudeepreechacharn S. Analysis of two-phase induction motor using dynamic model based on MATLAB/Simulink. Asian Journal on Energy and Environment, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 48-59.
8. Ismagilov F.R., Hairullin I.H., Boykova O.A., Pashali D.Y. Diagnostics of capacitor single-phase induction motors taking into account technological and operational factors. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2011, no. 34 (251), pp. 28-34. (In Russian)
9. Hayakwong E., Kinnares V., Bunlaksananusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2016, pp. 1-6.
10. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE, 2019, pp. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487.
11. Collins E.R., Puttgen H.B., Sayle W.E. Single-phase induction motor adjustable speed drive: Direct phase angle control of the auxiliary winding supply. Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1988, pp. 246-252. DOI: 10.1109/IAS.1988.25070.
12. Meshcheryakov V.N., Belousov A.S. Development of a control algorithm for three-phase inverter of two-phase electric drive to reduce the number of switching. *Vestnik IGEU* [Bulletin of the Ivanovo State Technical University], 2019, no. 3, pp. 49-61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061. (In Russian)

Белоусов А.С., Мещеряков В.Н. Снижение пусковых токов и моментов двухфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет задержек фазных напряжений // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 42-48. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48

Belousov A.S., Meshcheryakov V.N. Reducing the Values of Initial Current and Torques of a Two-Phase Induction Motor Due to Delays of Phase Voltages. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 42-48. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 620.9 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-49-54

Барбасова Т.А.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск

МЕТОД МНОГОУРОВНЕВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И НОРМИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Крупное металлургическое предприятие имеет сложную многоуровневую структуру управления потреблением энергетических ресурсов. При этом для предприятия в целом на верхнем уровне общее потребление электрической энергии определяется по высокоточным приборам коммерческого учета. На нижнем уровне – уровне технологических объектов, как правило, реализуется технологический учет потребления электрической энергии с пониженной точностью. Кроме того, разнообразие режимов технологического оборудования приводит к различным уровням потребления энергии в разных режимах, что усложняет задачу прогнозирования и нормирования потребления энергии технологическим оборудованием. Повышенный уровень неопределенности потребления энергии на технологическом уровне обуславливает определенный небаланс при учете потребления энергии на основе данных технологического учета, которые используются для решения задачи прогнозирования и нормирования потребления. Здесь необходимо найти рациональный баланс оценок высокой точности на уровне предприятия в целом и технологическим учетом потребления электрической энергии отдельными технологическими объектами предприятия. В работе предложен алгоритм прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии технологическими объектами металлургического предприятия, основанный на методике оптимального согласования данных коммерческого учета на уровне предприятия с данными уровня технологического учета по критерию минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии. Полученные энергетические характеристики могут быть использованы при решении задач оптимизации технологических процессов по критерию минимума потребления энергии, а также для нормирования энергопотребления.

Ключевые слова: ресурсосбережение, энергосбережение, ресурсосберегающее управление, прогнозирования потребления электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Федерального законодательства энергосбережение является одним из главных направлений технической политики нашей страны. Несмотря на это, показатели энергоемкости производства Российской Федерации в настоящее время значительно превышает соответствующие показатели для передовых промышленно развитых стран. Особенно это касается металлургии. Металлургия является крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов. Вопросы нормирования и прогнозирования электрической энергии в металлургической промышленности освещены в работах Никифорова Г.В.[1], Копцева Л.А., Япрынцевой И.А. [2-4], Казаринова Л.С. [5-7] и других авторов [8-22].

На **рис. 1** приводится пример схемы организации работы по прогнозированию и нормированию потребления электрической энергии теплоэнергетического комплекса металлургического предприятия.

Одной из проблем централизованного планирования электропотребления в сложных технологических комплексах является получение достоверных зависимостей энергопотребления технологических процессов от текущего уровня производства продукции.

Данные зависимости могут быть получены на основе технологических испытаний и проведения энергетического обследования оборудования. Однако подобный подход для крупных предприятий, содержащий сотни и тысячи технологических объектов, является весьма трудоемким. В следствие этого получение достоверных данных часто является не реализуемым в полном объеме. Для восполнения недостающих сведений используется статистика текущих данных эксплуатации, накопленная в результате измерений в АСУ ТП.

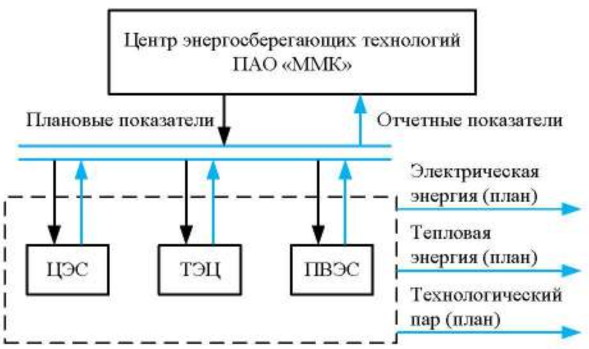


Рис. 1. Примерная схема организации работ по прогнозированию и нормированию потребления электрической энергии теплоэнергетического комплекса металлургического предприятия

Одной из проблем централизованного планирования электропотребления в сложных технологических комплексах является получение достоверных зависимостей энергопотребления технологических процессов от текущего уровня производства продукции.

Данные зависимости могут быть получены на основе технологических испытаний и проведения энергетического обследования оборудования. Однако подобный подход для крупных предприятий, содержащий сотни и тысячи технологических объектов, является весьма трудоемким. В следствие этого получение достоверных данных часто является не реализуемым в полном объеме. Для восполнения недостающих сведений используется статистика текущих данных эксплуатации, накопленная в результате измерений в АСУ ТП.

Задача прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии технологическими объектами для металлургического предприятия является сложной. Данная сложность возникает из-за противоречий высокой точности учета на уровне предприятия в целом и высокой неопределенности расчетов потребления энергии на уровне технологических объектов. На уровне предприятия в целом стоят высокоточные приборы учета. На нижнем уровне технологических объектов вследствие неопределенности данных, обусловленной разными причинами, суммарная оценка потребления электрической энергии может отличаться от данных коммерческого учета по предприятию в целом. Это усложняет решение задач прогнозирования и нормирования, поэтому необходимо найти баланс между оценками разных уровней учета потребления электрической энергии.

В соответствии со сказанным в работе предложен алгоритм прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии технологическими объектами металлургического предприятия, основанный на методике минимизации общей ошибки прогнозирования потребления электрической энергии для предприятия в целом.

АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Предположим, что генеральная ошибка представления данных на общесистемном уровне определяется соотношением

$$E_0^2 = 0,5\sum_k \left(W_{0,k}^{\text{c}} - \sum_{i=1}^{n} W_{i,k}^{\text{p}} \right)^2, \qquad (1)$$

где $W_{0,k}^{\text{c}}$ – фактический объем потребления электрической энергии за k-й период в соответствии с данными потребления по предприятию в целом согласно средствам коммерческого учета; $W_{i,k}^{\text{p}}$ – оценка объема потребления электрической энергии i-м потребителем за k-й период в соответствии с расчетными данными.

Дана локальная ошибка представления данных на локальном уровне подразделений предприятия

$$E_i^2 = 0,5\sum_k \left(W_{i,k}^{\text{c}} - W_{i,k}^{\text{p}} \right)^2, \qquad (2)$$

где $W_{i,k}^{\text{c}}$ – фактический объем потребления электрической энергии i-м потребителем за k-й период согласно средствам коммерческого учета.

Будем предполагать, что расчет оценок потребления электрической энергии у локального потребителя осуществляется по формуле

$$W_{i,k}^{\text{p}} = \exp\left(a_i P_i + b_i \right) P_i, \qquad (3)$$

где P_i – объем выпуска продукции за отчетный период.

Неизвестные коэффициенты зависимостей (3) определяются на локальных выборках данных известными методами, например методом наименьших квадратов. В результате будут получены локальные оценки неизвестных параметров a_{il}, b_{il}.

Вследствие неопределенности данных на локальном уровне локальные оценки могут не вполне соответствовать генеральным данным на уровне всего предприятия в целом. С целью согласования подобного межуровневого противоречия необходимо уточнение локальных оценок с использованием генеральных данных.

С этой целью вводится следующая норма уклонения параметров a_i оценок типа (3), полученных на данных генерального уровня, от аналогичных оценок a_{il} того же типа, но полученных на данных локального уровня:

$$R_i^2 = 0,5\left(a_i - a_{il} \right)^2. \qquad (4)$$

В этом случае на генеральном уровне может быть поставлена задача оценки параметров зависимостей (3) с учетом данных генерального уровня:

$$\min_{(a,b)} Q, \quad Q = \left(1 - \alpha_R \right) E_0^2 + \alpha_R R_i^2. \qquad (5)$$

Решение задачи (5) может быть выполнено, например, градиентным методом.

ПРИМЕР РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ЦЭС, ТЭЦ, ПВЭС ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПАО «ММК»

Анализ приведен на выборке статистических данных по выработке основных видов продукции электрических станций ЦЭС, ТЭЦ, ПВЭС теплоэнергетического комплекса ПАО «ММК», расходу электроэнергии для выработки основных видов продукции и общему расходу электроэнергии по основным показателям за летний период (в период с мая 2010 г. по июль 2012 г.).

В качестве терминальных точек прогноза выбраны следующие месяцы, в которых станции работали в сопоставимых условиях: август 2012, сентябрь 2012, май 2007, июль 2009.

В **табл. 1** приведены данные суммарного потребления электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС:

$W_{\text{ф}}$ – фактическое потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС ПАО «ММК»;

$W_{\text{р}}$ – расчетное потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС;

$W_{\text{р ммк}}$ – расчетное потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС по методике ПАО «ММК»;

$E_{\text{р}}$ – ошибка прогнозирования.

Расчет точности прогнозирования на выбранных терминальных точках расчета выполняется по следующей формуле:

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} \dfrac{\left| W_{\text{ф}i} - W_{\text{р }i} \right|}{W_{\text{р }i}}}{m} = \frac{0,081939492}{4} = 0,02048.$$

Расчет точности прогнозирования ПАО «ММК»:

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} \dfrac{\left| W_{\text{ф}i} - W_{\text{р ммк}i} \right|}{W_{\text{р ммк}i}}}{m} = \frac{0,09887}{4} = 0,02472,$$

где $W_{\text{ф }i}$ – фактическое потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС ПАО «ММК» на i-м интервале расчета; $W_{\text{р }i}$ – расчетное потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС на i-м интервале расчета; $W_{\text{р ммк } i}$ – расчетное потребление электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС по методике ПАО «ММК» на i-м интервале расчета.

В **табл. 2** приведено сравнение точности прогнозирования предложенного алгоритма по сравнению с принятой методикой ПАО «ММК». Точность рассматриваемого алгоритма для терминальных точек прогноза выше на 0,42%.

На основе предложенного алгоритма разработано программное обеспечение прогнозирования потребления энергетических ресурсов промышленным предприятием. Пример отчета и экранная форма разработанного программного обеспечения показаны на **рис. 2** и **3**.

Таблица 1

Данные суммарного потребления электрической энергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС

№ п/п	Дата	$W_{\text{р ммк}}$, кВт·ч	$W_{\text{ф}}$, кВт·ч	$W_{\text{р}}$, кВт·ч	$E_{\text{р}}$, кВт·ч	Точность $\dfrac{\lvert W_{\text{ф}i} - W_{\text{р } i}\rvert}{W_{\text{р } i}}$
1	Май 2010	47 737 366,67	47 576 252,00	47 464 241,73	112 010,27	0,00235989
2	Июнь 2010	42 929 646,43	42 683 011,00	42 749 132,39	-66 121,39	0,00154673
3	Июль 2010	43 707 705,57	43 558 248,00	43 467 423,83	90 824,17	0,00208948
4	Август 2010	46 466 406,70	46 550 221,00	46 646 219,44	-95 998,44	0,00205801
5	Сентябрь 2010	45 715 341,16	45 615 239,00	45 755 710,40	-140 471,40	0,00307003
6	Май 2011	48 029 620,92	47 731 585,00	47 661 903,87	69 681,13	0,00146199
7	Июнь 2011	45 919 764,07	45 668 133,00	45 780 492,77	-112 359,77	0,00245432
8	Июль 2011	46 167 703,95	46 020 702,00	45 979 526,15	41 175,85	0,00089553
9	Август 2011	47 326 079,12	47 284 410,00	47 274 842,55	9 567,45	0,00020238
10	Сентябрь 2011	47 128 058,44	46 978 179,00	46 962 839,99	15 339,01	0,00032662
11	Май 2012	74 865 225,03	48 122 165,00	48 098 328,89	23 836,11	0,00049557
12	Июнь 2012	46 237 204,28	46 235 081,00	46 032 272,31	202 808,69	0,00440579
13	Июль 2012	48 370 885,14	48 452 882,00	48 628 138,65	-175 256,65	0,00360402
	Прогноз					
14	**Август 2012**	49 684 719,37	49 478 897,00	49 445 530,50	33 366,50	0,00067481
15	**Сентябрь 2012**	47 320 075,78	47 789 103,00	47 796 025,91	-6 922,91	0,00014484
16	**Май 2007**	46 849 909,23	46 024 732,00	47 505 758,79	-1 481 026,79	0,03117573
17	**Июль 2009**	47 877 339,93	44 659 713,00	42 535 324,32	2 124 388,68	0,04994410

Таблица 2

Сравнение точности прогнозирования предложенного алгоритма

№ п/п	Вариант расчета	Точность, д.е.
1	Расчет точности прогнозирования ПАО «ММК»	0,02472
2	Расчет точности прогнозирования предложенного алгоритма	0,02048

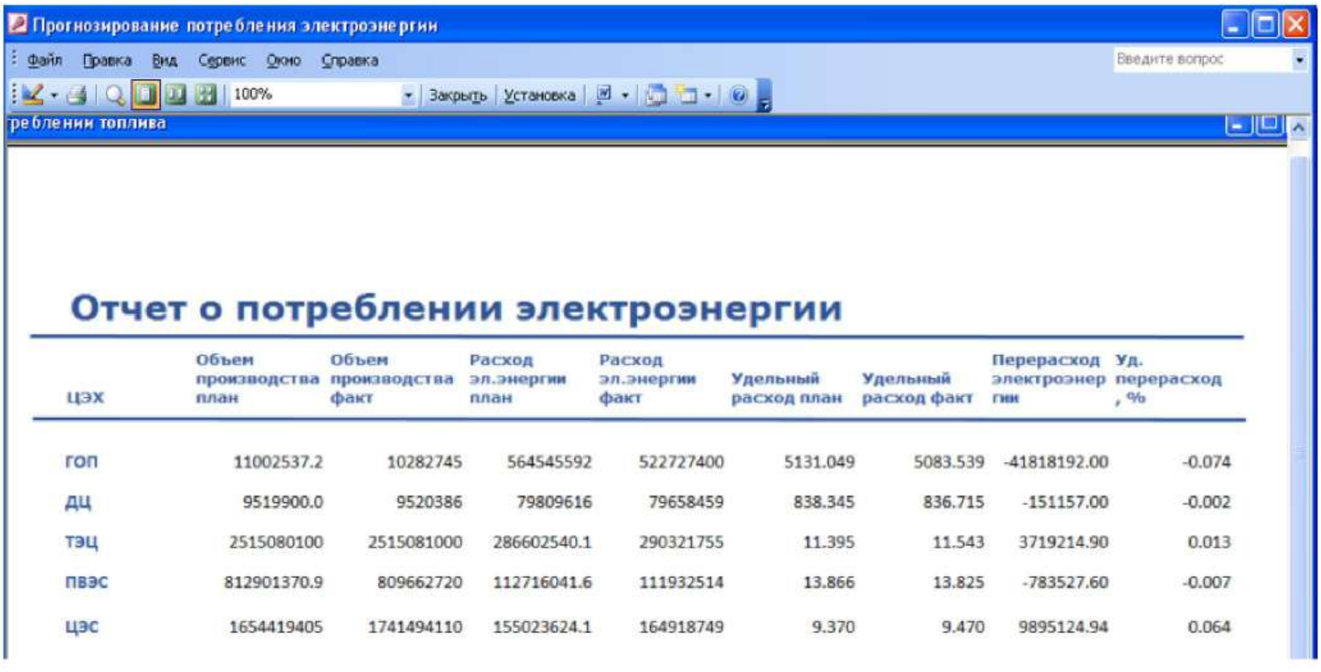


Рис. 2. Пример отчета о потреблении и перерасходе электроэнергии производственными подразделениями ПАО «ММК»

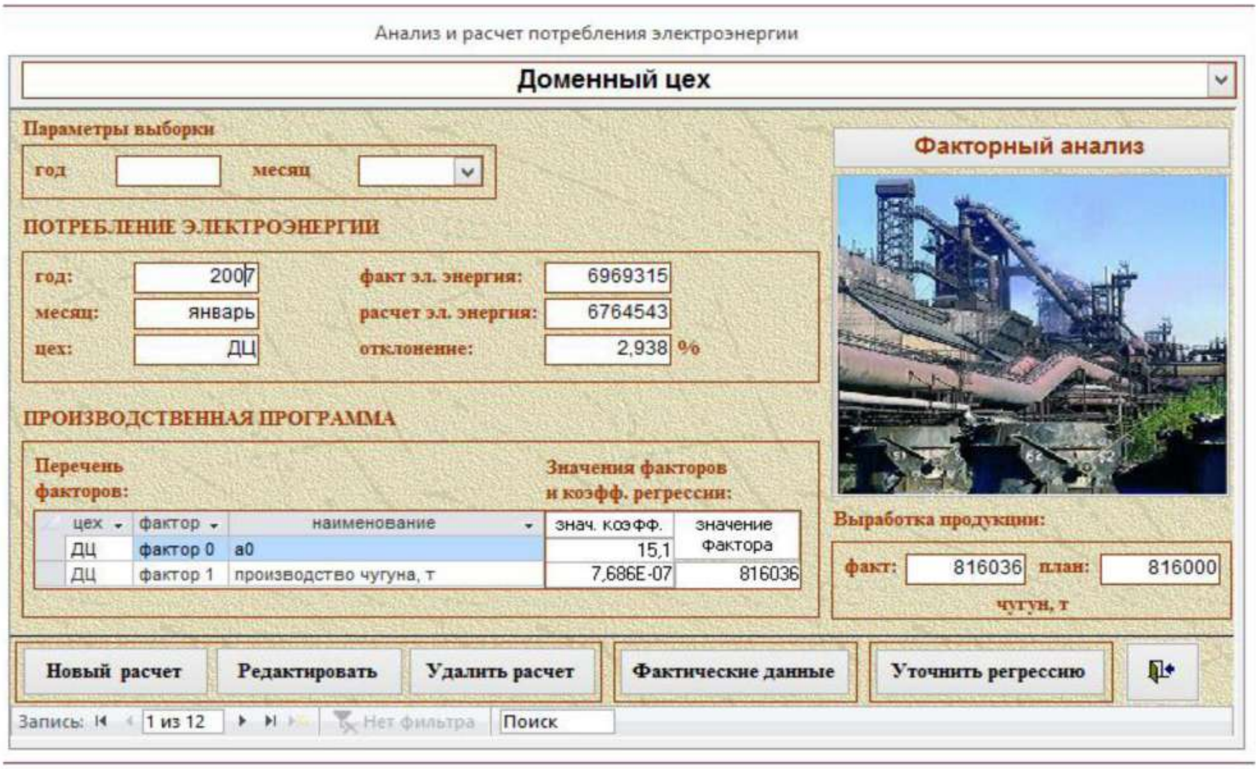


Рис. 3. Экранная форма разработанного программного обеспечения контроля и прогнозирования потребления энергетических ресурсов на примере доменного цеха

Заключение

Для согласования коммерческого учета потребления электрической энергии с технологическим учетом потребления электрической энергии отдельными технологическими объектами предприятия необходимо решать задачу корректировки расчетного суммарного потребления электрической энергии на уровне отдельных технологических объектов.

В работе предложена процедура оптимального решения задачи согласования оценок объемов потребления электрической энергии на уровне технологических объектов и объемов потребления электрической энергии на уровне данных коммерческого учета для всего предприятия в целом.

С использованием разработанного алгоритмического и программного обеспечения на основе реальных данных по выработке продукции и потреблению электроэнергии станциями ТЭЦ, ЦЭС и ПВЭС ПАО «ММК» проведены опытные расчеты. Расчеты показали, что на основе приведенного алгоритма многоуровневого прогнозирования возможно повышение точности прогнозирования потребления электрической энергии на величину 0,42 %.

Данная методика может быть рекомендована для использования при решении задач прогнозирования и нормирования потребления энергетических ресурсов для предприятий со сложной технологической структурой.

Список литературы

1. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат, 2003. 480 с.
2. Копцев Л.А. Энергосбережение и повышение экономической эффективности предприятия путем управления загрузкой производственных агрегатов // Промышленная энергетика. 2011. № 11. С. 14-21.
3. Копцев Л.А. Нормирование и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от объемов производства // Промышленная энергетика. 1996. № 3. С. 5-7.
4. Копцев Л.А., Япрынцева И.А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» // Промышленная энергетика. 2004. Вып. №5. С. 2-6.
5. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Захарова А.А. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13. № 2. С. 12-24.
6. Казаринов Л.С. Системы. Управление и познание: аналитические очерки. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. 496 с.
7. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, О.В. Колесникова, Т.А. Барбасова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 228 с.
8. Политов Е.А. Построение моделей долгосрочного прогноза потребления электроэнергии и мощности промышленными предприятиями: автореф. дис. … канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 19 с.
9. Derek W Bunn. Experimental study of a Bayesian method for daily electricity load forecasting / Applied Mathematical Modelling. 1980, vol. 4, iss. 2, pp. 113-116. DOI: 10.1016/0307-904X(80)90115-8.
10. Jose Ramon Cancelo, Antoni Espasa, Rosmarie Grafe. Forecasting the electricity load from one day to one week ahead for the Spanish system operator // International Journal of Forecasting. 2008, vol. 24, iss. 4, pp. 588-602. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.07.005.
11. Sigauke C., Chikobvu D. Prediction of daily peak electricity demand in South Africa using volatility forecasting models // Energy Economics. 2011, vol. 33, iss. 5, pp. 882-888. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.02.013.
12. Amina M., Kodogiannis V.S., Petrounias I., Tomtsis D. A hybrid intelligent approach for the prediction of electricity

consumption // Electrical Power and Energy Systems. 2012, vol. 43, iss. 1, pp. 99-108. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.05.027.
13. Virginie Dordonnat, Siem Jan Koopman, Marius Ooms. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling // Computational Statistics and Data Analysis. 2012, vol. 56, iss. 11, pp. 3134-3152. DOI: 10.1016/j.csda.2011.04.002.
14. Andersen F.M., Larsen H.V., Boomsma T.K. Long-term forecasting of hourly electricity load: Identification of consumption profiles and segmentation of customers // Energy Conversion and Management. 2013, vol. 68, pp. 244-252. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.01.018.
15. Gloria Martin-Rodriguez, Jose Juan Caceres-Hernandez. Modelling the hourly Spanish electricity demand // Economic Modelling. 2005, vol. 22, iss. 3, pp. 551-569. DOI: 10.1016/j.econmod.2004.09.003.
16. Andersen F.M., Larsen H.V., Gaardestrup R.B. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas (Denmark) // Applied Energy. 2013, vol. 110, pp. 147-162. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.046.
17. Vincenzo Bianco, Oronzio Manca, Sergio Nardini. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models // Energy. 2009, vol. 34, iss. 9, pp. 1413-1421. DOI: 10.1016/j.energy.2009.06.034.
18. Afshar K., Bigdeli N. Data analysis and short term load forecasting in Iran electricity market using singular spectral analysis (SSA) // Energy. 2011, vol. 36, iss. 5, pp. 2620-2627. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.003.
19. Mohammed El-Telbany, Fawwaz El-Karmi. Short-term forecasting of Jordanian electricity demand using particle swarm optimization // Electric Power Systems Research. 2008, vol. 78, iss. 3, pp. 425-433. DOI: 10.1016/j.epsr.2007.03.011.
20. Jawad Nagi, Keem Siah Yap, Farrukh Nagi, Sieh Kiong Tiong, Syed Khaleel Ahmed. A computational intelligence scheme for the prediction of the daily peak load // Applied Soft Computing. 2011, vol. 11, iss. 8, pp. 4773-4788. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.07.005.
21. Ashok S. Peak-load management in steel plants // Applied Energy. 2006, vol. 83, iss. 5, pp. 413-424. DOI: 10.1016/j.apenergy.2005.05.002.
22. Lin C.W., Moodie C.L. Hierarchical production planning for a modern steel manufacturing system. International Journal of Production Research. 1989, vol. 27, iss. 4, pp. 613-628. DOI: 10.1080/00207548908942572.

Поступила в редакцию 01 октября 2020 г.

Information in English

Method of Multilevel Forecasting and Rationing of Electric Energy Consumption by the Enterprise

Tatyana A. Barbasova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, School of Electronic Engineering and Computer Science, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation, e-mail: barbasovata@susu.ru, barbasovata@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2248-2894.

A large metallurgical enterprise has a complex multilevel hierarchical structure for managing energy consumption. High-precision commercial metering devices for the enterprise as a whole determine total electric energy consumption. At the lower level, that is, at the level of technological facilities, technical accounting of electric energy consumption is implemented by means of metering devices providing lower measurement accuracy. Besides, a great diversity of operating modes of production equipment results in various levels of electric energy consumption in different modes, which makes the task of energy consumption and rationing very complicated. Thus, high uncertainty level of energy consumption at the production level results in certain misbalance during accounting of energy consumption on the basis of data obtained from the production metering devices, which is used to solve the problems of consumption forecasting and rationing. It is necessary to find a balance of high accuracy of devices for commercial accounting of electric energy consumption and technical accounting of electric energy consumption by individual technological facilities of the enterprise.The paper proposes an algorithm for predicting and rationing electric energy consumption by technological facilities of a metallurgical enterprise based on a method of minimizing a general error in predicting electric energy consumption in an energy and metallurgical complex.The obtained energy characteristics can be used in solving problems of optimizing technological processes according to the criterion of minimum energy consumption, as well as for rationing energy consumption.

Keywords: resource saving, energy saving, resource saving management, power consumption forecasting.

References

1. Nikiforov G.V., Oleinikov V.K., Zaslavets B.I. *Energosberezhenie i upravlenie energopotrebleniem v metallurgicheskom proizvodstve* [Energy conservation and energy consumption management in metallurgical production]. Moscow: Energoatomizdat, 2003. 480 p. (in Russian)
2. Koptsev L.A. Energy saving and increasing the economic efficiency of the enterprise by managing the loading of production units. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2011, no. 11, pp. 14-21. (in Russian)
3. Koptsev L.A. Rationing and forecasting of electricity consumption depending on production volumes. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 1996, no. 3, pp. 5-7. (in Russian)
4. Koptsev L.A., Yapryntseva I.A. Modeling of fuel consumption at MMK OJSC. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2004, no. 5, pp. 2-6. (in Russian)
5. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Zakharova A.A. Method of predictive management of energy efficiency of an industrial enterprise. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics]. 2013, vol. 13, no. 2, pp. 12-24. (in Russian)
6. Kazarinov L.S. *Upravlenie i poznanie: analiticheskie ocherki* [Systems, Control and Cognition: analytical essays]. Chelyabinsk: South Ural State University Publishing Center, 2017. 496 p. (in Russian)
7. Kazarinov L.S., Schneider D.A., Kolesnikova O.V., Barbasova T.A. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya v energosberezhenii (opyt razrabotki)* [Automated control systems in energy saving (development experience)]. Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2010. 228 p.
8. Politov E.A. *Postroenie modeley dolgosrochnogo prognoza potrebleniya elektroenergii i moscshnosti promyshlennymi predpriyatiyami: avtoreferat diss. na soiskanie uchenoy*

stepeni kand. tekhn. nauk [Building models for the long-term forecast of electricity and power consumption by industrial enterprises: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Kemerovo, 2012, 19 p.
9. Derek W Bunn. Experimental study of a Bayesian method for daily electricity load forecasting / Applied Mathematical Modelling. 1980, vol. 4, iss. 2, pp. 113-116. DOI: 10.1016/0307-904X(80)90115-8.
10. Jose Ramon Cancelo, Antoni Espasa, RosmarieGrafe. Forecasting the electricity load from one day to one week ahead for the Spanish system operator // International Journal of Forecasting. 2008, vol. 24, iss. 4, pp. 588-602. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2008.07.005.
11. Sigauke C., Chikobvu D. Prediction of daily peak electricity demand in South Africa using volatility forecasting models // Energy Economics. 2011, vol. 33, iss. 5, pp. 882-888. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.02.013.
12. Amina M., Kodogiannis V.S., Petrounias I., Tomtsis D. A hybrid intelligent approach for the prediction of electricity consumption // Electrical Power and Energy Systems. 2012, vol. 43, iss. 1, pp. 99-108. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.05.027.
13. Virginie Dordonnat, Siem Jan Koopman, Marius Ooms. Dynamic factors in periodic time-varying regressions with an application to hourly electricity load modeling // Computational Statistics and Data Analysis. 2012, vol. 56, iss. 11, pp. 3134-3152. DOI: 10.1016/j.csda.2011.04.002.
14. Andersen F.M., Larsen H.V., Boomsma T.K. Long-term forecasting of hourly electricity load: Identification of consumption profiles and segmentation of customers // Energy Conversion and Management. 2013, vol. 68, pp. 244-252. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.01.018.
15. Gloria Martin-Rodriguez, Jose Juan Caceres-Hernandez. Modelling the hourly Spanish electricity demand // Economic Modelling. 2005, vol. 22, iss. 3, pp. 551-569. DOI: 10.1016/j.econmod.2004.09.003.
16. Andersen F.M., Larsen H.V., Gaardestrup R.B. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas (Denmark) // Applied Energy. 2013, vol. 110, pp. 147-162. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.046.
17. Vincenzo Bianco, OronzioManca, Sergio Nardini. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models // Energy. 2009, vol. 34, iss. 9, pp 1413-1421. DOI: 10.1016/j.energy.2009.06.034.
18. Afshar K., Bigdeli N. Data analysis and short term load forecasting in Iran electricity market using singular spectral analysis (SSA) // Energy. 2011, vol. 36, iss. 5, pp. 2620-2627. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.003.
19. Mohammed El-Telbany, Fawwaz El-Karmi. Short-term forecasting of Jordanian electricity demand using particle swarm optimization // Electric Power Systems Research. 2008, vol. 78, iss. 3, pp. 425-433. DOI: 10.1016/j.epsr.2007.03.011.
20. Jawad Nagi, KeemSiah Yap, Farrukh Nagi, SiehKiong Tiong, Syed Khaleel Ahmed. A computational intelligence scheme for the prediction of the daily peak load // Applied Soft Computing. 2011, vol. 11, iss. 8, pp. 4773-4788. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.07.005.
21. Ashok S. Peak-load management in steel plants // Applied Energy. 2006, vol. 83, iss. 5, pp. 413-424. DOI: 10.1016/j.apenergy.2005.05.002.
22. Lin C.W., Moodie C.L. Hierarchical production planning for a modern steel manufacturing system. International Journal of Production Research. 1989, vol. 27, iss. 4, pp. 613-628. DOI: 10.1080/00207548908942572.

Барбасова Т.А. Метод многоуровневого прогнозирования и нормирования потребления электрической энергии предприятием// Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 49-54. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-49-54

Barbasova T.A. Method of Multilevel Forecasting and Rationing of Electric Energy Consumption by the Enterprise. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 49-54. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49))-49-54

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.313.5 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63

Христинич Р.М.[1], Христинич Е.В.[1], Христинич А.Р.[2]

[1]Красноярский государственный аграрный университет
[2]Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения)

МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В ТРАНСПОРТНОМ КОВШЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СЛОЖНОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ В ANSYS

Приготовление сложнокомпонентных алюминиевых сплавов с использованием свинца требует интенсивного объёмного перемешивания алюминиевого сплава. В настоящее время приготовление сплавов алюминий-свинец осуществляется в индукционных тигельных печах. Однако свинец загрязняет футеровку индукционной тигельной печи, что требует проведения капитального ремонта по её замене при переходе на приготовление других алюминиевых сплавов. Более прогрессивным в настоящее время является применение комплекса для электромагнитного перемешивания алюминиевого сплава в транспортном ковше. Целью работы является создание численной математической модели с использованием ANSYS для исследования параметров комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше. Математическая модель позволяет комплексно исследовать влияние электромагнитных параметров индуктора на скорость, траекторию движения, распределение легирующих компонентов и температуры алюминиевого расплава в транспортном ковше. При разработке математической модели использован базовый программный пакет ANSYS для решения электромагнитной задачи и пакет ANSYS CFX для решения гидродинамической и тепловой задач. Разработана численная математическая модель системы «электромагнитный индуктор - транспортный ковш - алюминиевый расплав» для анализа эффективности работы комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава с целью получения сложнокомпонентных алюминиевых сплавов на основе свинца и магния. Представлены комплексные решения, включающие электромагнитную, гидродинамическую и термодинамическую задачи применительно к перемешиванию и распределению свинца и магния в высокотемпературном алюминиевом расплаве. Проведен сравнительный анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований для достижения максимальной эффективности распределения свинца или магния с использованием комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше. Математическая модель, реализованная в программном комплексе ANSYS, включающая совместные решения электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач может быть использована при разработке комплексов электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше для приготовления сложнокомпонентных алюминиевых сплавов на основе свинца. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований электромагнитного перемешивания расплава алюминий-свинец в транспортном ковше рекомендуется использовать на алюминиевых и металлургических заводах при приготовлении сложнокомпонентных сплавов.

Ключевые слова: комплекс, электромагнитное перемешивание, алюминиевый расплав, лигатура свинца, электромагнитный индуктор, транспортный ковш, трехмерная численная математическая модель, электромагнитная задача, гидродинамическая задача, термодинамическая задача.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное перемешивание электропроводных расплавов в миксерах, печах и транспортных ковшах широко применяется во всем мире [1-3]. Электромагнитное воздействие является бесконтактным воздействием, что не вносит дополнительных включений в расплав [4]. Эффективное электромагнитное перемешивание алюминиевых расплавов, в основном, применяется для рафинирования, очистки алюминиевых расплавов от щелочных и щелочноземельных металлов, криолита [5].

Применение электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортных ковшах является новой технологией приготовления сложнокомпонентных сплавов с минимальными затратами [6]. Такая технология является перспективной технологией по отношению к технологии приготовления алюминиевых сплавов в тигельных печах. После использования в качестве лигатуры свинца футеровка тигельной печи пропитывается им, и при переходе на другой сплав требуется замена футеровки. Это требует больших капитальных и финансовых затрат.

Использование электромагнитного индуктора [7-9] для приготовления сплавов «алюминиевый расплав - свинец» в транспортных ковшах требует значительно меньших энергетических затрат, чем использование индукционной тигельной печи и ускоряет введение транспортного ковша в повторную эксплуатацию после замены футеровки.

Эффективность приготовления таких сплавов с использованием комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава является эффективной технологией и практически не уступает по качеству приготовления алюминиевых сплавов в тигельных печах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Качество производимого алюминиевого полуфабриката с применением свинцовых, цинковых, магниевых легирующих зависит от многих факторов и требует интенсивного внешнего воздействия на расплав при его приготовлении. Такой алюминиевый сплав можно приготовить в транспортном ковше с использованием внешних источников интенсификации тепломассообмена алюминиевого расплава, например комплекса электромагнитного перемешивания (**рис. 1**).

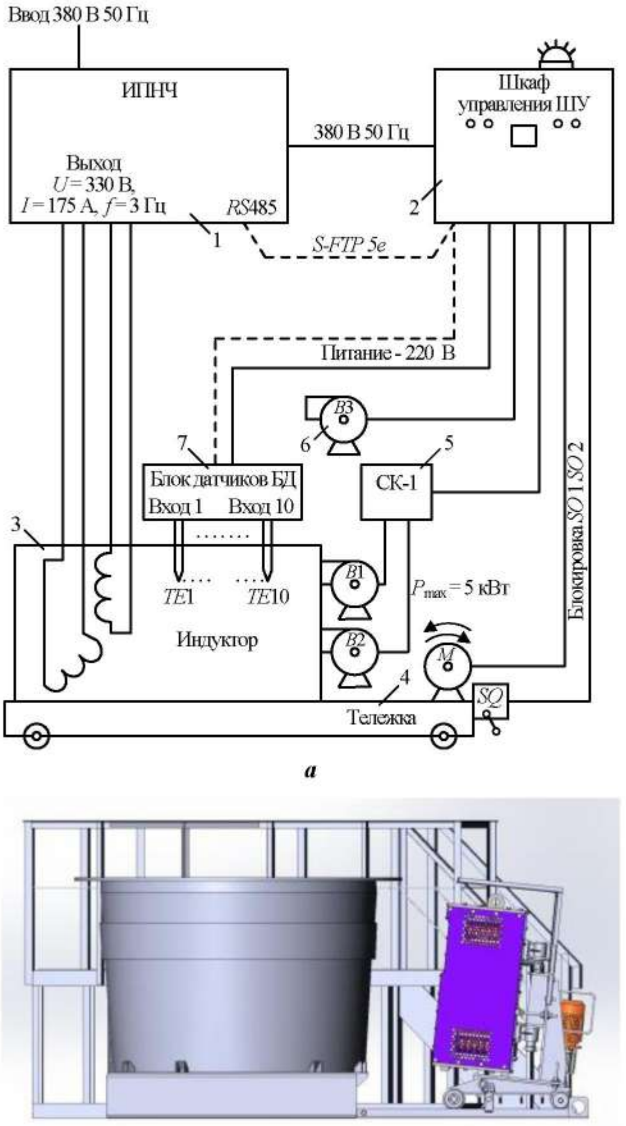


Рис. 1. Комплекс электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше:
а **– структурная схема комплекса;**
б **– индуктор возле транспортного ковша**

Комплекс электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше включает следующие основные узлы и системы (**рис. 1, *а***): систему электропитания, включающую источник питания низкой частоты 1 и шкаф управления и контроля температуры 2; электромагнитный индуктор 3 с тележкой перемещения 4; систему охлаждения индуктора 5, включающую приточные вентиляторы индуктора *В*1 и *В*2; систему газоудаления с вытяжным вентилятором 6; блок датчиков 7 контроля температуры индуктора. Исполнительным устройством комплекса электромагнитного перемешивания является электромагнитный индуктор [7-9], расположенный вдоль вертикальной образующей транспортного ковша с алюминиевым расплавом (**рис. 1, *б***). Основной частью комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава, где реализуются функции электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава, является система «индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом». Численная математическая модель для определения параметров системы «индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом» комплекса электромагнитного перемешивания для интенсификации тепломассообменных процессов в алюминиевом расплаве может быть реализована в программном комплексе ANSYS [10] и включает в себя следующие связанные задачи – электромагнитную, гидродинамическую и термодинамическую.

Основные допущения и свойства материалов при решении численной математической задачи принимаются следующими: поверхность алюминиевого расплава в транспортном ковше принимается в расчетах горизонтальной; плотность ρ и динамическая вязкость η расплава принимаются изотропными и не зависящими от температуры в рабочем диапазоне; скорость расплава в пограничном слое с футеровкой принимается равной нулю; удельное электрическое сопротивление алюминиевого расплава $\rho_э = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; относительная магнитная проницаемость алюминиевого расплава μ_r=1; удельное электрическое сопротивление магнитопровода индуктора вдоль шихтовки $\rho_в$=10^{-6} Ом·м и поперек шихтовки $\rho_н$=∞; относительная магнитная проницаемость стали магнитопровода и металлокаркаса транспортного ковша μ_r=300; удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость меди обмоток индуктора равны соответственно $\rho_{об}$=$1{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ом м, μ_r=1; удельное электрическое сопротивление внешнего пространства расчетной области $\rho_{вн}$=10^{12} Ом·м; относительная магнитная проницаемость окружающей среды μ_r=1; плотность алюминиевого расплава и шлака $\rho_{Ал}$=2356 кг/м^3; динамическая вязкость алюминиевого расплава $\eta_{Ал}$=$2 \cdot 10^{-3}$ Па·с; кинематическая вязкость алюминиевого расплава $v = 91 \cdot 10^{-8}$ м^2/с; теплопроводность и теплоемкость алюминиевого расплава и шлака равны соответственно $\lambda_{Ал}$=110 Вт/(м·°С), $c_{Ал}$=1250 Дж/(кг·°С); коэффициент черноты поверхности алюминиевого расплава, покрытого окисной пленкой ε=0,3; коэффициент температуропроводности алюминиевого расплава $a = 122 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Комплексное решение электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач системы «электромагнитный индуктор – транспортный ковш – алюминиевый расплав»

Для расчетов электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в ковше принят электромагнитный перемешиватель со следующими параметрами двухфазного индуктора: габаритные размеры 1200×300×300 мм; частота тока, питающего индуктор 1,0-3,0 Гц; ток индуктора 200 А (регулируемый); линейная токовая нагрузка 160000 А/м; охлаждение индуктора воздушное. Объем алюминиевого расплава в транспортном ковше составляет 4,2 т.

В расчетах принята толщина зазора между активной поверхностью магнитопровода индуктора и алюминиевым расплавом равная 85 мм. Это расстояние включает: огнеупорный слой бетона стенки ковша 65 мм; стальной металлокаркас ковша 8 мм; технологический зазор между индуктором и металлокаркасом ковша 12 мм; стальной пояс ковша толщиной 20 мм.

Электромагнитное поле индуктора, расположенного вдоль вертикальной образующей ковша (**рис. 2**), в расчетной области создается токами, зависящими не только от координат, но и от времени, которое описывается системой уравнений Максвелла [11].

Токовые нагрузки катушек обмотки индуктора определены в виде компонент вектора плотности тока, изменяющихся по синусоидальному закону:

$$\dot{\vec{J}} = \vec{J}_a \sin\left(\omega t + \varphi\right). \qquad (1)$$

Решение электромагнитной задачи в ANSYS [7] осуществляется при помощи уравнений Максвелла [11], представленных в виде системы уравнений для векторного магнитного потенциала:

$$\begin{gathered} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_a \gamma} \operatorname{div}\left(\operatorname{grad} \vec{A}\right) - \nabla\phi + \left(\vec{V} \times \operatorname{rot} \vec{A}\right); \\ \operatorname{div}\left(\gamma\left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla\varphi + \left(\vec{V} \times \operatorname{rot} \vec{A}\right)\right]\right) = 0, \end{gathered} \qquad (2)$$

которая посредством метода конечных элементов сводится к решению уравнений для нестационарного процесса [12].

Так как в системе «индуктор – ковш» присутствуют различные составляющие элементы: магнитопровод индуктора, катушки обмотки индуктора, металлокаркас ковша, стальной пояс ковша, футеровка ковша, расплав алюминия в ковше, то используются различные формы конечных элементов: для расчета индуктора используются элементы типа «гексаэдр» в количестве 70 тыс. единиц; для расчета ковша и его составных частей используются элементы типа «тетраэдр» в количестве 100 тыс. единиц. Суммарное количество единичных элементов в расчетной области системы «индуктор – ковш с алюминиевым расплавом-воздушная среда расчётной области» достигает 770 тыс.

Использование гексаэдров в конечно-элементном разбиении индуктора обусловлено необходимостью более точного расчета при наличии большого количества различных частей индуктора (секции обмоток, листы магнитопровода, воздушные зазоры). Наличие гексаэдров позволяет вести расчет с меньшими затратами расчетного времени, но создает трудности при осуществлении процесса конечно-элементного разбиения.

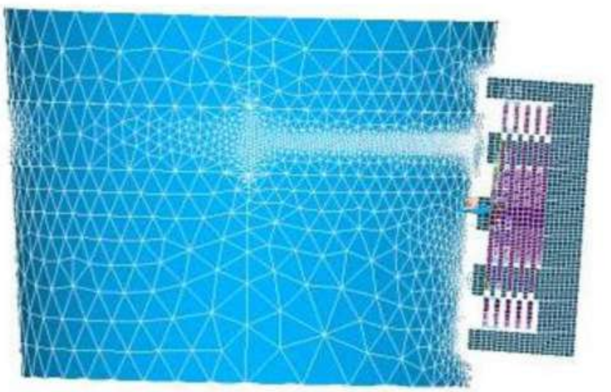


Рис. 2. Модель системы «индуктор – транспортный ковш» в ANSYS

Использование тетраэдров оправдано при расчетах более пространственных систем, например, транспортный ковш с алюминиевым расплавом. Особенностью разбиения в виде тетраэдров является более быстрое конечно-элементное разбиение, меньшая точность расчетов. Последнее компенсируется большими объемами однородной среды – алюминиевого расплава в транспортном ковше.

При увеличении тока в обмотке индуктора с 60 до 200 А (**рис. 3**) максимальное значение сил Лоренца увеличивается с 43 до 475 единиц. Частота при этом оставалась неизменная и равнялась 1,0 Гц. Таким образом, можно констатировать, что тяговое усилие при увеличении тока более чем в 3 раза увеличивается до 10 раз.

Задача расчета нестационарного движения алюминиевого расплава в ковше выполняется в среде ANSYS CFX [13].

Нестационарное гидродинамическое поле в области алюминиевого расплава описывается системой уравнений, которая включает уравнение неразрывности

$$\rho \operatorname{div}\left(u\right) = 0, \qquad (3)$$

а также уравнения для турбулентного движения среды

$$\begin{gathered} \rho\frac{\partial(U)}{\partial t} + \rho\cdot\operatorname{div}\left(Uu\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta\cdot\operatorname{div}\left(\operatorname{grad}\left(U\right)\right) + \\ + \left[-\rho\frac{\partial\left(u'^2\right)}{\partial x} - \rho\frac{\partial\left(u'v'\right)}{\partial y} - \rho\frac{\partial\left(u'w'\right)}{\partial z}\right] + F_{Лx}, \end{gathered} \qquad (4)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м^3; U – x компонента скорости, м/с; u – вектор скорости, м/с; P – давление, Па; η – динамическая вязкость, Па с; u' – возмущения x компоненты скорости; $F_{Лx}$ – силы Лоренца по x координатам, Н.

Аналогичные уравнения будут по осям y и z. Для взаимосвязи системы уравнений (3) – (4) применяется k - ε модель турбулентности, представленная уравнениями

$$\begin{gathered} \rho\frac{\partial\left(k\right)}{\partial t} + \rho\cdot\operatorname{div}\left(ku\right) = \\ = \operatorname{div}\left[\frac{\eta_t}{\sigma_k}\operatorname{grad}\left(k\right)\right] + 2\eta_t\left(E_{ij}\right)^2 - \rho\varepsilon; \end{gathered} \qquad (5)$$

$$\begin{gathered} \rho\frac{\partial\left(\varepsilon\right)}{\partial t} + \rho\cdot\operatorname{div}\left(\varepsilon u\right) = \\ = \operatorname{div}\left[\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}\operatorname{grad}\left(\varepsilon\right)\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}2\eta_t(E_{ij})^2 - C_{2\varepsilon\rho}\frac{\varepsilon^2}{k}. \end{gathered} \qquad (6)$$

где k – энергия турбулентных пульсаций; η_t – турбулентная вязкость; ε – энергия диссипации; E_{ij} – деформация объема; $\sigma_k = 1{,}00$; $\sigma_\varepsilon = 1{,}30$; $C_{1\varepsilon} = 1{,}44$; $C_{2\varepsilon} = 1{,}92$.

Турбулентная вязкость определяется исходя из отношения k и ε:

$$\eta_t = C_\mu \rho \vartheta l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \qquad (7)$$

где $\vartheta = k^{1/2}$ – масштаб скорости; $l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ – масштаб длины.

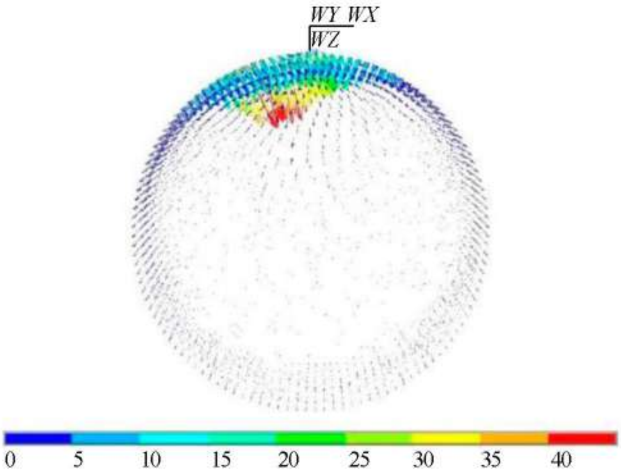


Рис. 3. Распределение сил Лоренца в алюминиевом расплаве транспортного ковша при токе индуктора 200 А

Для областей, занятых воздухом, шлаком и расплавом, задаются скорости для первой итерации стационарного решения:

$$V_{ijk}^{1} = 0. \tag{8}$$

Для области, занятой алюминиевым расплавом, задаются начальные условия для сторонних сил:

$$\vec{F}_{ijk}^{s} = 0. \tag{9}$$

Для инициализации движения алюминиевого расплава в ковше силы Лоренца, полученные в электромагнитном расчете и расположенные в узлах конечноэлементной сетки, передаются в ANSYS CFX. Количество единичных элементов, используемое для расчета движения алюминиевого расплава, равно около 600 тыс.

Нестационарное тепловое поле в расчетной трехмерной области алюминиевого расплава в транспортном ковше рассчитывается в ANSYS CFX [13, 14] и описывается уравнением, которое с учетом внутренних (сторонних) источников теплоты имеет вид

$$\rho c \frac{\partial(T)}{\partial t} + \rho c T \operatorname{div}(U) = \lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) + Q, \tag{10}$$

где ρ – плотность, кг/м^3; c – удельная теплоёмкость, Дж/кг °С; T – температура, °С; U – вектор скорости, м/с; λ – теплопроводность, (Вт/м·°С); Q – сторонние источники теплоты, Вт.

Последнее уравнение будет зависеть от физических параметров среды, ее плотности ρ и вязкости μ, от ускорения свободного падения g и давления ρ на поверхности среды и, например, для жидкости реализуется уравнением Навье-Стокса:

$$\begin{gathered}\rho \frac{\partial W_x}{\partial t} + \rho\left(W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z}\right) = \\ = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2}\right).\end{gathered} \tag{11}$$

Аналогичными будут уравнения, представленные по осям y и z.

Уравнения Навье-Стокса необходимо дополнить дифференциальным уравнением непрерывности для сжимаемых и несжимаемых сред соответственно:

$$\begin{gathered}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W_z)}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0.\end{gathered} \tag{12}$$

Расчет нестационарного теплового поля в алюминиевом расплаве также выполняется в ANSYS CFX. Для всей расчетной области задается начальное распределение температур, участвующих в первой итерации стационарного решения.

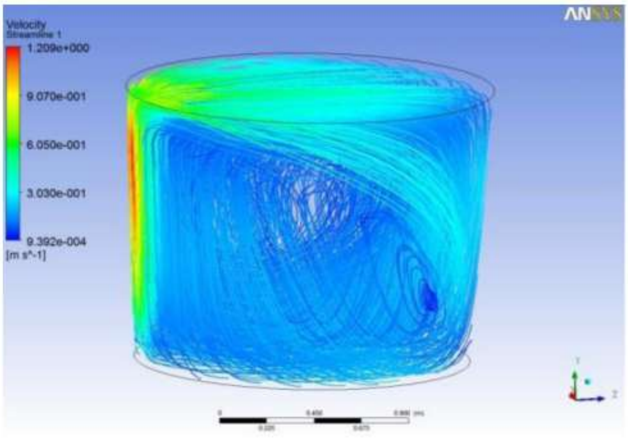
Отличительной особенностью численной математической модели комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше, реализованной в программном комплексе ANYS, является совместное решение трехмерных электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач системы «электромагнитный индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом», решаемых в динамике на едином временном интервале. Разработанная модель позволяет варьировать и изучать зависимости эффективности перемешивания алюминиевого расплава в объеме транспортного ковша от следующих факторов: механических, электрических и магнитных параметров индуктора; физических свойств элементов транспортного ковша; гидродинамических и тепловых характеристик алюминиевого расплава и твердой лигатуры.

Гидродинамический расчет процессов движения алюминиевого расплава в транспортном ковше

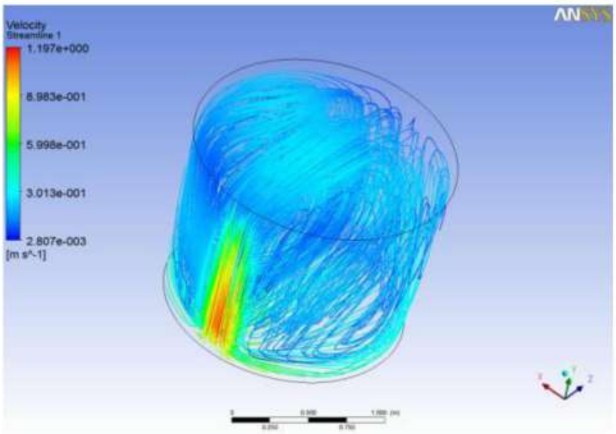
При исследовании движения алюминиевого расплава в транспортном ковше индуктор располагался вдоль вертикальной образующей ковша [15]. Здесь возможны два варианта движения электромагнитного поля индуктора и алюминиевого расплава в транспортном ковше: вверх к зеркалу алюминиевого расплава (**рис. 4, *а***), вниз ко дну транспортного ковша (**рис. 4, *б***).

В пристенной области ковша со стороны индуктора с током в катушках 200 А максимальное значение скорости алюминиевого расплава достигает значений 0,8–1,0 м/с (см. **рис. 4**). При таком движении ширина потока алюминиевого расплава у зеркала метала и дна ковша составляет не менее 0,8 м/с. При удалении расплава от индуктора происходит его растекание по объему транспортного ковша, что предопределяет некоторое снижение скорости до 0,25-0,4 м/с. Ширина активного потока расплава у зеркала металла и дна ковша составляет не менее 2/3 диаметра ковша.

Когда индуктор расположен вдоль вертикальной образующей транспортного ковша, то при движении алюминиевого расплава вверх и вниз наблюдаются области с минимальными значениями скоростей движения алюминиевого расплава, которые разнесены в пространстве. При промышленной эксплуатации такой установки в процессе перемешивания алюминиевого расплава необходимо выполнять реверс бегущего электромагнитного поля индуктора для более полной проработки всего объема алюминиевого расплава в транспортном ковше.



а



б

Рис. 4. Поле скоростей и траектории движения алюминиевого расплава в транспортном ковше: при движении электромагнитного поля индуктора вверх ковша (*а*) и вниз ковша (*б*)

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ СВИНЦА ПРИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИИ НА ДНЕ ТРАНСПОРТНОГО КОВША

При введении в алюминиевый расплав транспортного ковша свинцовой лигатуры частицы свинца опускаются на дно ковша. Под действием гидродинамических сил должно происходить вовлечение частиц свинца в поток алюминиевого расплава и их транспортировка во все точки объема жидкого алюминия в транспортном ковше.

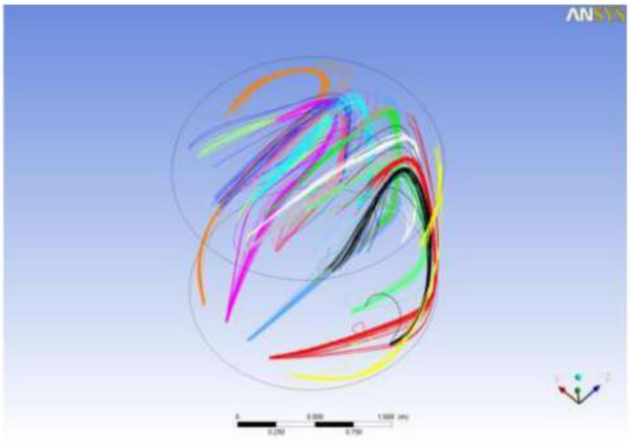
Рассмотрим два варианта исследования траекторий движения частиц свинца, расположенных на дне транспортного ковша в потоке жидкого алюминия: движение бегущего электромагнитного поля индуктора направлено вниз ковша; движение бегущего электромагнитного поля индуктора направлено вверх ковша.

В рассматриваемой модели частицы свинца расположены на дне ковша, так как это положение частиц свинца является наиболее трудным для их вовлечения в алюминиевый расплав. Количество точек для исследования траекторий движения частиц свинца в алюминиевом расплаве принимается равным 15 единиц: 5 точек у индуктора; 5 точек в средней части дна ковша; 5 точек у дальней части дна ковша. Плотность частиц свинца принята равной плотности свинца и составляет 11340 кг/м^3, что в 5 раз превышает плотность алюминиевого расплава.

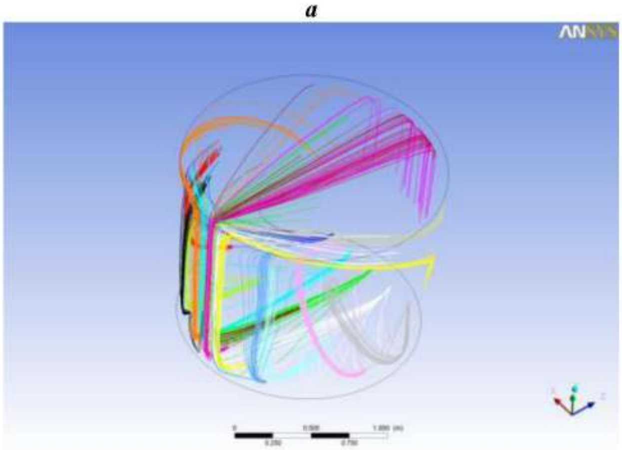
Движение алюминиевого расплава в транспортном ковше осуществляется под действием сил Лоренца, генерируемых бегущим электромагнитным полем, направленным вниз или вверх соответственно. Скорость движения алюминиевого расплава у дна ковша со стороны индуктора составляет 0,8-1,0 м/с при токе в обмотках индуктора 200 А и снижается при удалении от индуктора. Траектория движения каждой частицы свинца отмечена своим цветом, что упрощает анализ их пути.

На **рис. 5, *а*** представлены траектории движения частиц свинца, поднятых со дна ковша, при движении электромагнитного поля индуктора вниз по истечении 30 с работы индуктора. Как видно из рисунка, все частицы свинца активно вовлекаются расплавом алюминия в движение, хотя скорость расплава в области дна транспортного ковша для удаленных от индуктора частиц свинца составляет около 0,5–0,65 м/с. На **рис. 5, *б*** представлены траектории движения частиц свинца, поднятых со дна транспортного ковша, при движении электромагнитного поля индуктора вверх на протяжении 210 с работы индуктора.

При расположении частиц свинца на дне транспортного ковша и движении алюминиевого расплава вверх в области индуктора свинец распределяется практически по всему объему алюминиевого расплава в транспортном ковше и дальше снова вовлекается в интенсивный поток алюминиевого расплава, генерируемый индуктором для более полного распределения по объему транспортного ковша.



а



б

Рис. 5. Траектории движения частиц свинца в алюминиевом расплаве при движении бегущего электромагнитного поля индуктора вниз (*а*) и вверх (*б*)

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ЛИГАТУРЫ СВИНЦА В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ В ТРАНСПОРТНОМ КОВШЕ

Лигатура свинца загружается посредством вбрасывания брикетов в алюминиевый расплав транспортного ковша суммарным весом 80 кг.

Важным этапом оценки эффективности перемешивания лигатуры свинца в алюминиевом расплаве транспортного ковша является определение интенсивности тепломассообмена при воздействии электромагнитных сил в алюминиевом расплаве, генерируемых электромагнитным полем индуктора.

Основные допущения и постановка задачи: алюминиевый расплав в транспортном ковше и лигатура свинца разбиты на две области и в каждой области задана единая температура; лигатура свинца представлена единым объемом, расположенным на дне транспортного ковша; температура алюминиевого расплава в транспортном ковше в начальный момент принята 800°C; лигатура свинца представлена в виде цилиндрических брикетов «алюминий-свинец» диаметром 100 мм и высотой 50 мм; состав лигатуры свинца: 50% – алюминий, 45% – свинец, 5% – медь; усредненная плотность лигатуры свинца составляет 6700 кг/м^3; температура лигатуры свинца перед загрузкой составляет 20 °C.

Загрузка лигатуры свинца в количестве 80 кг образует на дне транспортного ковша цилиндрическую низкотемпературную подложку высотой 30-35 мм. Температура лигатуры свинца после расплавления принимается 330 °C.

Требуется определить: скорость прогрева лигатуры свинца до температуры алюминиевого расплава при интенсивном движении алюминиевого расплава в ковше под действием электромагнитного поля индуктора; изменение температуры алюминиевого расплава после расплавления лигатуры свинца.

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛИГАТУРЫ СВИНЦА И ДВИЖЕНИИ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНИЗ

При движении алюминиевого расплава под действием электромагнитных сил вниз транспортного ковша картина распределения температуры будет иметь вид, представленный на **рис. 6.**

Анализ **рис. 6** доказывает, что индуктор, установленный с боковой стороны транспортного ковша и генерирующий бегущее электромагнитное поле вниз, позволяет эффективно перемешивать лигатуру свинца в алюминиевом расплаве во всем объеме.

Градиент температур в алюминиевом расплаве транспортного ковша через 360 с работы электромагнитного перемешивателя, установленного с боковой стороны ковша, не превышает 27° С (максимальное значение температуры 758 °C; минимальное значение температуры –731° С). Дальнейшее электромагнитное перемешивание алюминиевого расплава приведет к более равномерному распределению лигатуры свинца во всем объеме алюминиевого расплава и позволит снизить градиент температуры в алюминиевом расплаве до 3-5°C.

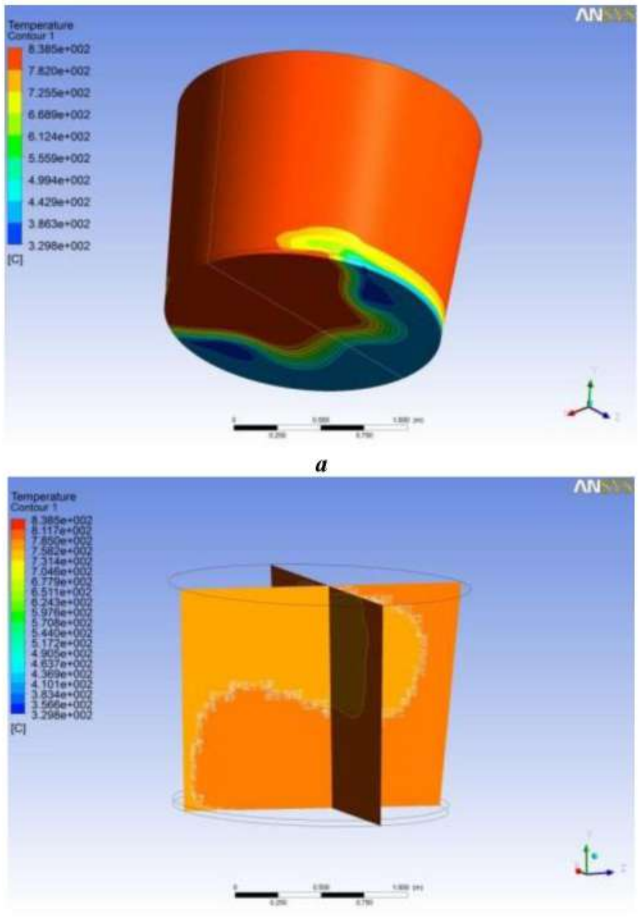


Рис. 6. Распределение температуры при электромагнитном перемешивании алюминиевого расплава: *а* – через 180 с; *б* – через 360 с

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛИГАТУРЫ СВИНЦА И ДВИЖЕНИИ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВВЕРХ

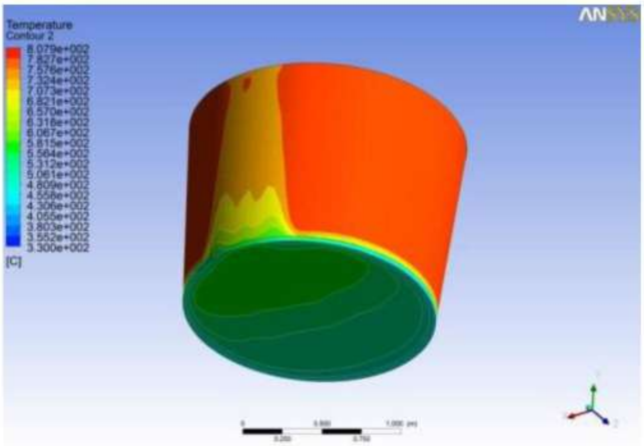
При движении алюминиевого расплава под действием электромагнитных сил вверх транспортного ковша к зеркалу расплава картина распределения температуры будет иметь вид, представленный на **рис. 7.**

При движении бегущего электромагнитного поля индуктора вверх интенсивность тепломассообмена между лигатурой свинца и алюминиевым расплавом также является эффективной. Градиент изменения температуры алюминиевого расплава по объему транспортного ковша не превышает 27 °C через 360 с его перемешивания.

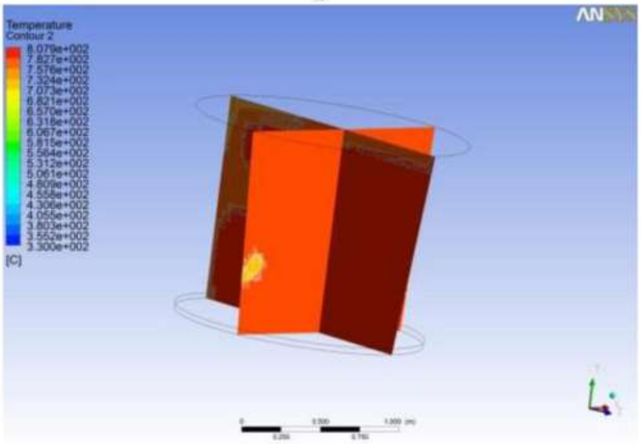
В **таблице** представлены результаты распределения свинца в алюминиевом расплаве транспортного ковша при электромагнитном перемешивании.

Масса алюминиевого расплава в транспортном ковше 3500 кг; начальная и конечная температура алюминиевого расплава 775 и 745°C соответственно; количество свинца загружаемого в алюминиевый расплав 40 кг при температуре 20°C.

Электрические параметры индуктора электромагнитного перемешивания в процессе проведения опытов следующие: величина тока в обмотке индуктора 230 А; частота питающего напряжения 1,5 Гц; время работы индуктора 30 мин; движение алюминиевого расплава – 10 мин вниз, 10 мин вверх, 10 мин вниз.



а



б

Рис. 7. Распределение температуры при электромагнитном перемешивании алюминиевого расплава: *а* – через 120 с; *б* – через 360 с

Результаты распределения свинца в алюминиевом расплаве

Легирующие элементы	Массовые доли легирующих элементов в алюминиевом расплаве при продолжительности перемешивания расплава Al-Pb, %		
	10 мин	20 мин	30 мин
Si	0,44	0,44	0,43
Fe	0,60	0,60	0,59
Cu	3,52	3,46	3,45
Mn	0,42	0,42	0,42
Mg	0,66	0,66	0,65
Cr	0,042	0,042	0,041
Ni	0,17	0,17	0,17
Zn	0,30	0,30	0,30
Ti	0,045	0,046	0,046
Pb	1,46	1,48	1,51
Bi	0,044	0,044	0,044
Sn	0,012	0,012	0,011

Образцы алюминиевого расплава в процессе проведения эксперимента брались в следующем порядке: через 10 мин перемешивания; через 20 мин перемешивания; через 30 мин перемешивания от начала эксперимента. Как показывают результаты, приведенные в **таблице**, через 10 мин работы комплекса электромагнитного перемешивания и движении алюминиевого расплава в области индуктора вниз массовая доля свинца в алюминиевом расплаве составляет 1,46%; через 30 мин электромагнитного перемешивания массовая доля свинца составляет 1,48%. Это подтверждает, что для эффективного распределения свинца по объему алюминиевого расплава достаточное время работы комплекса электромагнитного перемешивания может быть ограничено 10 мин.

При сливе алюминиевого расплава Al-Pb из транспортного ковша брались пробы в начале слива, в середине слива и в конце слива – разница в массовой доле свинца в пробах не превысила 5%. Это подтверждает удовлетворительное распределение свинца по всему объему алюминиевого расплава в транспортном ковше после его электромагнитного перемешивания.

Заключение

1. Разработана численная математическая модель включающая совместное решение электромагнитной, гидродинамической и термодинамической задач для расчета параметров системы «индуктор – транспортный ковш – алюминиевый расплав – лигатура свинца».

2. На основе решения электромагнитной задачи выполнены расчеты электромагнитных параметров системы «индуктор – транспортный ковш»; получены значения магнитной индукции на границе «футеровка – алюминиевый расплав», равные 0,3-0,4 Тл.

3. Результаты математического моделирования на основе взаимосвязанных на одном временном интервале электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач показали возможность повышения эффективности диспергирования свинца по сравнению с выплавкой сплава в индукционных тигельных печах, за счет периодического реверсирования направления бегущего магнитного поля при установленных скоростях жидкого алюминия в ковше, равные 0,8-1,0 м/с при токе в обмотках индуктора 200 А и частоте питающего напряжений 1,0 Гц.

4. Анализ картины распределения движения алюминиевого расплава в транспортном ковше показал, что все части объема алюминиевого расплава находятся в движении; реверс электромагнитного поля индуктора изменяет направление движения алюминиевого расплава на противоположное и позволяет исключить области со слабым перемешиванием.

5. Расчеты траекторий движения частиц свинца показывают, что при интенсивном движении алюминиевого расплава свинец эффективно распределяется по всему объему алюминиевого расплава транспортного ковша.

6. Выявлено, что полупериод движения частиц свинца со дна ковша составляет около 30 с. В дальнейшем частицы свинца вовлекаются в основной поток алюминиевого расплава, генерируемый электромагнитным полем индуктора.

7. Частицы свинца активно перемещаются в объеме алюминиевого расплава при направлении бегущего электромагнитного поля индуктора как вниз транспортного ковша, так и при изменении направления на противоположное – вверх ковша.

8. Решение термодинамической задачи показало, что загрузка лигатуры свинца в количестве 80 кг при

температуре 20°С и интенсивном электромагнитном перемешивании позволяет выровнять температуру лигатуры свинца и алюминиевого расплава через 360 с.

9. В результате экспериментальных исследований подтверждено, что работа комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше позволяет эффективно достигать равномерного распределения свинца в алюминиевом расплаве в течение 5–15 мин работы индуктора.

10. На основе представленной в работе численной математической модели можно разрабатывать эффективные и экономически оптимальные способы и комплексы электромагнитного перемешивания электропроводных расплавов в различных металлургических устройствах и агрегатах – ковшах, печах, миксерах, дегазаторах, фильтр-боксах, литейных машинах для получения высококачественных металлургических заготовок, в том числе с новыми физическими свойствами.

Список литературы

1. Окороков Н.В. Электромагнитное перемешивание металлов в дуговых сталеплавильных печах. М.: Металлургия, 1961. 176 с.
2. Гнучев С.М. Выплавка стали в дуговых печах с электромагнитным перемешиванием ванны // Сталь. 1961. № 6. С. 238-245.
3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
4. Христинич Р.М., Христинич А.Р. Повышение надежности электрического плавильно-литейного агрегата. Lap Lambert Academic Publishing. Germany, 2012. 174 с.
5. Электромагнитный перемешиватель для рафинирования алюминия в ковшах / В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, В.В. Стафиевская, А.М. Велентеенко // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. 2003. №5(25). Ч.2. С. 167-170.
6. Бабкин В.Г., Чеглаков В.В., Христинич Р.М. Диспергирование свинца при выплавке алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg с добавками Pb в условиях регулирования структурообразования // Металлург. 2019. №10. С 76-81.
7. Пат. 109615 Российская Федерация, МПК H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Христинич Е.В., Христинич А.Р. №2011121478/07; заявл. 25.05.2011; опубл. 20.10.2011.
8. Пат. 118485 Российская Федерация, МПК H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. №2012107917/07; заявл. 01.03.2012; опубл. 20.07.2012.
9. Пат. 123602 Российская Федерация, МПК H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью НПО «Металлургэнергопром» № 2012117266/07; заявл. 26.04.2012; опубл. 27.12.2012.
10. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учебное пособие для вузов по специальности «Электрические и электронные аппараты» направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». М.: Академия, 2006. 288 с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 2. Электромагнитное поле: учебник для вузов. 12-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 389 с.
12. Zienriewich O.C. The finite element method. Volume 1/ O.C. Zienriewich, R.L. Taylor. Woburn: Butterwort – Heineman, 2000. 712 p.
13. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Фёдорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
14. Проектирование электротехнологических установок. Тепловой расчет: метод. указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов укрупненной группы направления подготовки специалистов 140000 – «Энергетика. Энергетическое машиностроение и электротехника» / сост.: А.Р. Христинич, Р.М. Христинич, Е.В. Христинич. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. 51 с.
15. Разработка численно-математической модели диспергирования свинца в расплаве алюминия при обработке в транспортном ковше: отчет о НИР / ООО «НПО Металлургэнергопром»; по договору №2288/17 от 20 июля 2017 г., рук. работы Р.М. Христинич, Красноярск, 2017 г. 106 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

NUMERICAL MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX ELECTROMAGNETIC STIRRING OF ALUMINUM MELT IN THE TRANSPORT LADLE IN THE PROCESS OF COMPLEX COMPONENT ALLOYS PRODUCTION IN ANSYS

Roman M. Khristinich

D. Sc. (Engineering), Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail:rkhristinich@mail.ru

Elena V. Khristinich

Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: ekhristinich@mail.ru

Aleksey R. Khristinich

Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Systems for Ensuring the Movement of Trains, Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: lex_0986@mail.ru.

The preparation of complex-component aluminum alloys using lead requires intensive volumetric mixing of the aluminum alloy. Currently, the preparation of aluminum-lead alloys is carried out in induction crucible furnaces. However, lead contaminates the lining of the induction crucible furnace, which requires a major overhaul to replace it when switching to the preparation of other aluminum alloys. At present, it is more progressive to use a complex for electromagnetic stirring of an aluminum alloy in a transport bucket. The aim of the work is to create a numerical mathematical model using ANSYS to study the parameters of the complex for electromagnetic stirring of the aluminum melt in the transport ladle. The mathematical model makes it possible to comprehensively study the influence of electromagnetic parameters of the inductor on the speed, trajectory of movement, the distribution of alloying components and the temperature of the aluminum melt in the transport ladle. When developing a mathematical model, the basic software package ANSYS was used to solve the electromagnetic problem and the ANSYS CFX package was used to solve hydrodynamic and thermal problems. A numerical mathematical model of the system "electromagnetic inductor - transport ladle - aluminum melt" has been developed to analyze the efficiency of the complex for electromagnetic stirring of the aluminum melt in order to obtain complex-component aluminum alloys based on lead and magnesium. Complex solutions are presented including electromagnetic, hydrodynamic and thermodynamic problems as applied to mixing and distribution of lead and magnesium in a high-temperature aluminum melt. The comparative analysis of the results of mathematical modeling and experimental research was carried out to achieve the maximum efficiency of the distribution of lead or magnesium using the complex for electromagnetic stirring of an aluminum melt in the transport ladle.The mathematical model implemented in the ANSYS software package, including joint solutions of electromagnetic, hydrodynamic and thermal problems, can be used in the development of complexes for electromagnetic stirring of the aluminum melt in the transport ladle for the preparation of complex-component aluminum alloys based on lead. The results of mathematical modeling and experimental studies of electromagnetic stirring of the aluminum-lead melt in the transport ladle are recommended to be used at aluminum and metallurgical plants in the preparation of complex-component alloys.

Keywords: complex, electromagnetic stirring, aluminum melt, lead alloy, electromagnetic inductor, transport ladle, three-dimensional numerical mathematical model, electromagnetic problem, hydrodynamic problem, thermodynamic problem.

REFERENCES

1. Okorokov N.V. *Elektromagnitnoe peremeshivanie metallov v dugovyh staleplavilnyh pechah* [Electromagnetic stirring of metals in steel arc furnaces]. Moscow: Metallurgy, 1961. 176 p. (In Russian)
2. Gnuchev S.M. Smelting of steel in arc furnaces with electromagnetic mixing of the bath. *Stal* [Steel], 1961, no. 6, p. 238-245. (In Russian)
3. Voldek A. I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid metal working fluid]. L.: Energiya, 1970. 272 p. (In Russian)
4. Khristinich R.M., Khristinich A.R. *Povyshenie nadezhnosti elektricheskogo plavilno-liteynogo agregata* [Improving the reliability of the electric smelting and casting machine]. Lap Lambert Academic Publishing. Germany, 2012.174 p. (In Russian)
5. Timofeev V.N., Khristinich R.M., V.V. Stafievskaya, Velenteeko A.M. Electromagnetic stirrer for aluminum refining in ladles // *Vestnik UGTU-UPI. Elektromehanicheskiei elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravljaemye elektromehanicheskie sistemy* [Bulletin of USTU-UPI. Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled electromechanical systems. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI], 2003, no. 5(25), Part 2, pp. 167-170. (In Russian)
6. Babkin V.G., Cheglakov V.V. and Khristinich R.M. Lead dispersion in smelting of aluminum alloys of the Al-Cu-Mg system with Pb additives under conditions of the structure formation control. *Metallurg* [Metallurgist], 2019, no. 10, pp. 76-81. (In Russian)
7. Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi induktsionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no. 109615, 2011.
8. Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi indukcionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no 118485, 2012.
9. Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi induktsionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no. 123602, 2012.
10. Buhl O.B. *Metody rascheta magnitnyh system elektricheskih apparatov. Programma ANSYS: uchebnoe posobie dlja vuzov po specialnosti "Elektricheskie i elektronnye apparaty" napravlenija "Elektrotehnika, Elektromehanika i elektrotehnologii".* [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices. ANSYS program: a textbook for universities in the specialty "Electrical and electronic devices" of the direction "Electrical engineering, electromechanics and electrotechnology"]. Moscow: Academy, 2006. 288 p. (In Russian)
11. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2 t. Tom 2. Elektromagnitnoe pole: ucheb. dlja vuzov. 12-e izd., ispr. i dop.* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 volumes. Volume 2. Electromagnetic field: textbook for universities. 12th ed., Revised and enlarged edition]. Moscow: Yurayt, 2020. 389 p. (In Russian)
12. Zienriewich O.C. The finite element method. Volume 1/ O.C. Zienriewich, R.L. Taylor. Woburn: Butterwort - Heineman, 2000. 712 p.
13. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Y.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow: DMK Press, 2017. 210 p. (In Russian)
14. Khristinich R.M., Khristinich A.R., Khristinich E.V. *Proektirovanie elektrotehnologicheskih ustanovok. Teplovoy raschet: metod. Ukazanija po kursovomu i diplomnomu proektirovaniju dlja studentov ukrupnennoy gruppy napravlenija podgotovki specialistov 140000 – «Energetika. Energeticheskoe mashinostroenie i elektrotehnika».* [Design of electrical installations. Thermal calculation: method. Instructions on the course and diploma design for students of the enlarged group of the direction of training of specialists 140000 - "Energy. Power engineering and electrical engineering "]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; Polytechnical Institute, 2007. 51 p. (In Russian)
15. Research report «Development of a numerical and mathematical model of lead dispersion in aluminum melt during processing in a transport ladle» under contract No. 2288/17 dated July 20, 2017. Head of the Work R.M. Khristinich, «Research and production union Metallurgenergoprom» Ltd, Krasnoyarsk, 2017, 106 p.

Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Модель и результаты моделирования комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше при получении сложнокомпонентных сплавов в ANSYS // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 55-63. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63

Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. Numerical Mathematical Model of Complex Electromagnetic Stirring of Aluminum Melt in the Transport Ladle in the Process of Complex Component Alloys Production in Ansys. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 55-63. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63

Информационное, математическое и программное обеспечение технических систем

УДК 621.314 https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-64-72

Юдинцев А.Г.[1], Ткаченко А.А.[1], Ляпунов Д.Ю.[1,2]

[1]Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР, Томск
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Формирователь тока имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электроснабжения автономных объектов

В статье представлена нелинейная непрерывная математическая модель формирователя тока на базе замкнутого по входному току повышающего DC-DC-преобразователя. Этот преобразователь представляет собой подсистему имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электроснабжения автономных объектов небольшой мощности (до нескольких десятков киловат) различного назначения. Расчётное значение формируемого тока нагрузки составляет 180 А, принятое за центр разложения. Формируемый ток должен варьироваться в пределах ±10% относительно этого центра. Модель формирователя тока реализована как в непрерывной, так и в дискретной форме в среде Matlab Simulink с учётом параметрических возмущений в виде изменения эквивалентного выходного сопротивления преобразователя. Подтверждена адекватность разработанных моделей. Получена передаточная функция по току повышающего DC-DC-преобразователя с допущением постоянства его параметров. Эта функция реализована в виде структурной схемы и применена в качестве линеаризованной модели разомкнутого контура формирователя тока, что позволило использовать её для настройки регулятора тока. Результаты настроек на модульный, линейный и симметричный оптимумы проверены на нелинейной непрерывной модели. Эта модель позволяет выявлять особенности функционирования формирователя тока на этапе разработки с учётом разброса параметров компонентов силовых схем, оптимально настраивать регуляторы и подстраивать их с учётом формируемого тока нагрузки. Для настроенного на симметричный оптимум замкнутого контура формирователя тока проведен расчёт параметров задатчика интенсивности с целью уменьшения перерегулирования при пуске и предотвращения ограничения выхода регулятора на нулевом уровне. Регулятор обеспечивает заданный ток формирователя нагрузки во всём диапазоне, определяемом 10%-й окрестностью центра разложения. Предложенный подход позволяет значительно сократить временные и стоимостные затраты на процесс разработки формирователя тока в составе имитатора нагрузок для систем электроснабжения автономных объектов. Численные эксперименты, проведённые на непрерывной нелинейной модели, подтверждают правильность принятых допущений, что позволяет применять полученную модель для разработки различных вариантов имитаторов нагрузки.

Ключевые слова: формирователь тока, имитатор нагрузки, наземные испытания, система электроснабжения, автономный объект, повышающий DC-DC преобразователь, настройка регулятора, центр разложения, имитационная модель.

Введение

В настоящее время для наземных испытаний систем электроснабжения (СЭС) автономных объектов, применяемых в космосе и под водой (спутники и необитаемые подводные аппараты), в которых солнечные и аккумуляторные батареи применяются в качестве источников питания, используются формирующие ток нагрузки устройства, называемые имитаторами нагрузок (ИН). В состав ИН входит формирователь тока на базе повышающего DC-DC-преобразователя, замкнутого по входному току, являющемуся током нагрузки СЭС.

Методика разработки имитатора нагрузки освещена в статье [1], где отмечается важность построения математических и имитационных моделей силовых преобразователей с учётом разброса параметров элементов преобразователя (сопротивлений, индуктивностей, ёмкостей) на этапе разработки. Эти модели могут служить «цифровыми двойниками» силовых преобразователей как на этапе их разработки, так и в период эксплуатации для организации систем управления, чувствительных к изменениям параметров устройства. Там же проведено сравнение динамических характеристик, снятых на макетном образце повышающего DC-DC-преобразователя и на его модели в среде Matlab Simulink, подтверждена адекватность модели и возможность её применения для настройки регуляторов.

В статье [2] приведён обзор систем электроснабжения космических аппаратов, сформулированы требования к современным энергопреобразующим испытательным комплексам, имитирующих различные режимы работы систем электроснабжения и их электрические нагрузки.

Особенности проектирования и моделирования силовой части и системы управления имитатора солнечной батареи, задействованной в качестве источника питания на космическом аппарате, описана в статье [3], где учитывается нелинейность ВАХ солнечной батареи и рассматривается алгоритм работы системы управления.

Настоятельная необходимость применения современных программных продуктов для моделирования и разработки силовых преобразователей электроэнергии отмечается в [4-6], так как численные эксперименты в среде Matlab Simulink практически идентичны натурным экспериментам в процессе разработки силовых преобразователей электроэнергии.

Теоретическая часть

В данной статье объектом исследования является формирователь тока на базе повышающего DC-DC-преобразователя напряжения (**рис. 1**) и его система управления.

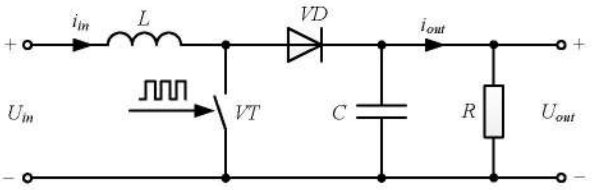


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема повышающего DC-DC-преобразователя напряжения: *L* – дроссель; *C* – конденсатор; *R* – сопротивление нагрузки; *VT* – транзистор; *VD* – диод; U_{in} – входное напряжение; U_{out} – выходное напряжение; i_{in} – входной ток; i_{out} – ток нагрузки (сигнал управления показан в виде серии импульсов); *L* = 100 мкГн, *C* = 1000 мкФ, *R* = 3,33 Ом

Для рассматриваемого ИН в качестве расчётного тока нагрузки является значение 180 А, которое принято за центр разложения. Диапазон изменения этого тока составляет ±10%, т.е. от 162 до 198 А. Перерегулирование не должно превышать 10% при набросе и сбросе нагрузки (переход из одного статического режима в другой). Формирователь тока должен обеспечивать заданное значение тока нагрузки при возможном 10%-м изменении эквивалентного сопротивления нагрузки. Коэффициент пульсаций тока в установившемся режиме не должен превышать 2,5%.

Система уравнений, описывающая данную схему, имеет вид [7]:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{in}(t)}{dt} = \dfrac{1}{L}\Big(U_{in}(t) - \big(1 - D(t)\big)U_{out}(t)\Big); \\ \dfrac{dU_{out}(t)}{dt} = \dfrac{1}{C}\Big(\big(1 - D(t)\big)i_{in}(t) - i_{out}(t)\Big), \end{cases} \quad (1)$$

где $D(t)$ – текущее значение скважности импульсов, которое можно рассматривать как непрерывную, так и импульсную периодическую функцию времени. Этой системе уравнений соответствует структурная схема (**рис. 2**) с учётом того, что $i_{out}(t) = U_{out}(t)/R$.

Для сокращения временных и стоимостных затрат на синтез и, если это необходимо, подстройку регулятора, важно иметь линеаризованную модель объекта управления (повышающего DC-DC-преобразователя). В этом случае представляется возможным использовать стандартные методики настройки регуляторов на модульный, линейный и симметричный оптимумы [8]. Для этой цели преобразуем структурную схему (см. **рис. 2**) таким образом, чтобы входной величиной являлся сигнал задания на ток нагрузки.

Для повышающего преобразователя с идеальными элементами применимо следующее уравнение энергетического баланса, представленное в [9]:

$$U_{in}i_{in} = U_{out}i_{out}. \quad (2)$$

Выходное напряжение с учётом скважности импульсов выражается формулой

$$U_{out} = \frac{1}{1 - D}U_{in}, \quad (3)$$

где, как отмечалось выше, выходной ток

$$i_{out}(t) = \frac{U_{out}(t)}{R}. \quad (4)$$

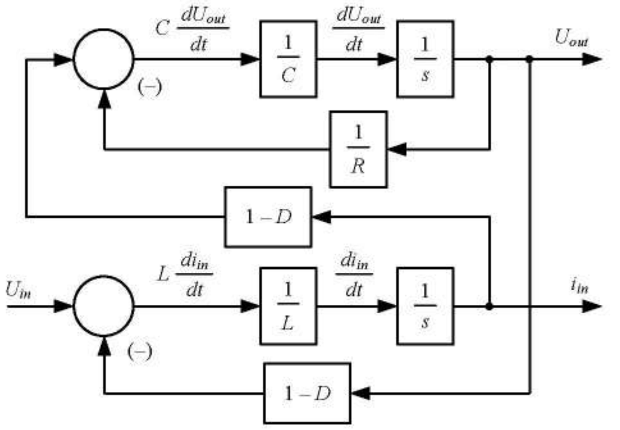


Рис. 2. Структурная схема повышающего преобразователя

Подставим выражения (3) и (4) в уравнение (2), выразив входной ток i_{in}. Получим соотношение:

$$i_{in} = \frac{U_{in}}{R(1 - D)^2}. \quad (5)$$

Из этого соотношения находим величину $1 - D$, которая присутствует в структурной схеме (см. **рис. 2**) в качестве задающего сигнала (входа):

$$1 - D = \sqrt{\frac{U_{in}}{i_{in}R}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) вычисляем значение скважности D, при котором задание на входной ток i_{ref} = 180 А, что соотвествует половине максимального тока:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{U_{in}}{i_{ref}R}} = 1 - \sqrt{\frac{27}{180 \cdot 3{,}33}} = 0{,}79 = \text{const}. \quad (7)$$

Нелинейная структурная схема повышающего преобразователя, который представляет собой разомкнутый контур формирователя тока с заданием на ток i_{ref} в качестве входной величины, приведена на **рис. 3**.

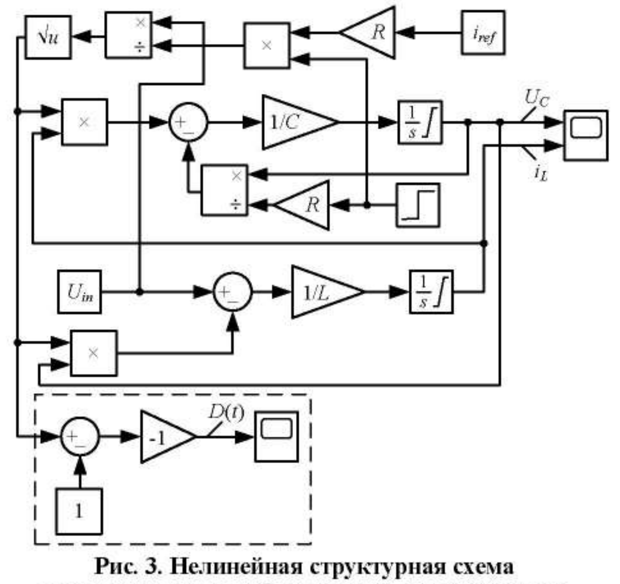


Рис. 3. Нелинейная структурная схема повышающего преобразователя, реализованная в среде *Matlab Simulink*, с током задания i_{ref} в качестве входной величины

Разработанная схема позволяет исследовать переходные характеристики повышающего DC-DC-преобразователя с учётом возможности изменения эквивалентного сопротивления нагрузки на выходе преобразователя в пределах ±10%. При этом к известной структурной схеме силовой части добавлена система управления, в которой задающим сигналом является ток i_{ref}, а зависимая от скважности импульсов величина $1 - D$ вычисляется на основе соотношения (6). Для вычисления текущего значения скважности импульсов D схема (см. **рис. 3**) дополнена соответствующим блоком в нижней части рисунка, обведённым штриховой линией и реализующим выражение (7). Применительно к разомкнутой системе на выходе этого блока будет постоянное значение скважности импульсов $D = 0{,}79$.

Переходные характеристики входного тока и выходного напряжения, полученные при исследовании моделей (**рис. 2** и **3**), приведены на **рис. 4**.

Как видно из графиков, характеристики совпадают с высокой степенью точности. Укрупнённый фрагмент кривой входного тока для установившегося режима работы, где можно оценить различие между непрерывной и дискретной моделями, приведён в верхней части **рис. 4**. Размах пульсаций входного тока не превышает 4,2 А, что соответствует коэффициенту пульсаций, равному 2,33%. Следовательно, структурную схему можем применять как базовую для исследования формирователя тока и синтеза его регулятора. Для этой цели воспользуемся структурной схемой на **рис. 3**. Таким образом, мы имеем дело с непрерывной системой автоматического управления повышающим DC-DC-преобразователем, позволяющей исследовать качество настройки регулятора тока. Саму же настройку проводим на линеаризованной модели преобразователя, представленной в виде передаточной функции, где коэффициенты постоянны, а меняется лишь сигнал ошибки, равный разности сигнала задания i_{ref} и обратной связи i_{in}.

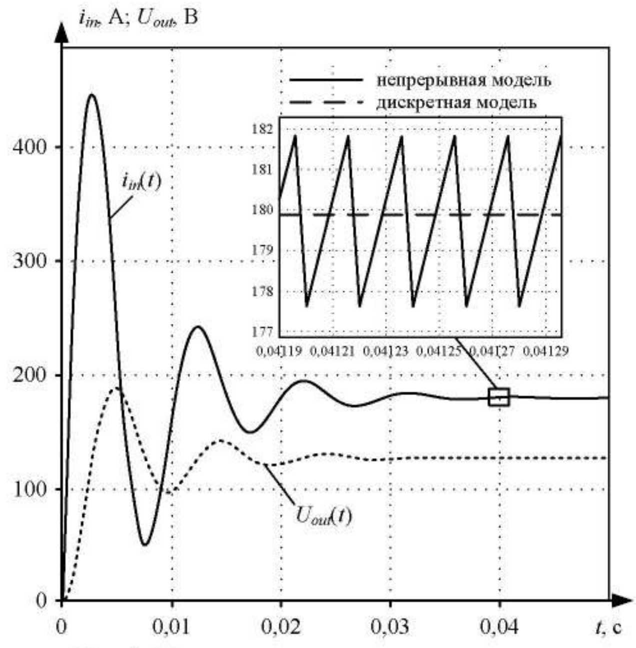


Рис. 4. Переходные характеристики входного тока и выходного напряжения

Для вывода передаточной функции линеаризованной модели повышающего DC-DC-преобразователя воспользуемся методикой, представленной в [10] и структурной схемой на **рис. 2**, в которой входной величиной является U_{in}, а выходной – i_{in}. При этом скважность импульсов примем равной $D = 0{,}79$.

Вывод осуществляется на основании структурной схемы на **рис. 2** следующим образом:

$$W_{\text{п}}(s) = \frac{i_{in}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{\dfrac{1}{Ls}}{1 + (1-D)^2 \dfrac{1}{Ls} \cdot \dfrac{\dfrac{1}{Cs}}{1 + \dfrac{1}{RCs}}} =$$

$$= \frac{\dfrac{1}{Ls}}{1 + (1-D)^2 \dfrac{1}{Ls} \cdot \dfrac{R}{1 + RCs}} = \tag{8}$$

$$= \frac{RCs + 1}{LRCs^2 + Ls + (1-D)^2 R} =$$

$$= \frac{1}{(1-D)^2 R} \cdot \frac{RCs + 1}{\dfrac{LC}{(1-D)^2} s^2 + \dfrac{1}{(1-D)^2} \dfrac{L}{R} s + 1}.$$

Проведём ряд замен в выражении (8): $K = 1/\left[(1-D)^2 R\right]$; $T_1 = RC$; $T_2 = \sqrt{LC}/(1-D)$. В результате преобразований получаем компактное выражение для передаточной функции линеаризованной модели устройства при условии малого изменения скважности импульсов D:

$$W_{\text{п}}(s) = K \frac{T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1}; \tag{9}$$

$$\xi = \frac{L}{2(1-D) R \sqrt{LC}},$$

где ξ – коэффициент демпфирования.

Далее преобразуем передаточную функцию (9) таким образом, чтобы входной величиной являлся ток задания, как это показано на **рис. 3**. С этой целью принимаем допущение, что $U_{in} = \text{const} = 27$ В, включая промежуток времени до момента $t = 0$. Таким образом:

$$W_{\text{пi}}(s) = W_{\text{п}}(s) \frac{U_{in}(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{i_{in}(s)}{U_{in}(s)} \cdot \frac{U_{in}(s)}{i_{ref}(s)} =$$

$$= \frac{U_{in}}{i_{ref}} K \frac{T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1} = \tag{10}$$

$$= \frac{T_1 s + 1}{T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1},$$

где $i_{ref} = i_{ref}(s)|_{s=0} = \text{const} = 180$ А – установившееся значение задания на входной ток, $(U_{in}/i_{ref})K = 1$ согласно выражению (5) и замене, проведённой в выражении (8).

Линеаризованная имитационная модель преобразователя представлена на **рис. 5**.

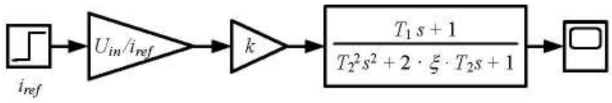


Рис. 5. Линеаризованная модель повышающего DC-DC-преобразователя в среде Matlab Simulink: i_{ref} = 180 А, U_{in} = 27 В, K = 6,67, $T_1 = 3{,}33 \cdot 10^{-3}$ с, $T_2 = 1{,}49 \cdot 10^{-3}$ с, $\xi = 0{,}224$

Отметим, что в этой схеме скважность импульсов является составляющей параметров K, T_2, ξ (см. выражения (8) и (9)) в предположении, что она варьируется в малой окрестности значения $D = 0{,}79$, что приемлемо для режимов, близких к расчётному.

Сопоставляя переходные процессы по входному току $i_{in}(t)$ для схем **рис. 3** и **5**, видим, что они абсолютно идентичны для заданного фиксированного значения скважности импульсов и соответствуют кривой $i_{in}(t)$, представленной на **рис. 4**. Следовательно, предположение, что линеаризованная модель повышающего DC-DC-преобразователя применима для настройки регулятора формирователя тока в некоторой окрестности скважности импульсов ΔD, достоверно. Эту гипотезу можно проверить, настроив формирователь тока на ряд оптимумов, существующих в практике автоматического управления.

Воспользуемся оптимальными настройками, которые применяются для синтеза систем управления [11, 12]. Желаемые передаточные функции разомкнутого контура при настройке на модульный и линейный оптимумы (МО и ЛО) соответственно имеют следующий вид:

$$W_{\text{раз}}^{\text{ж(МО)}}(s) = \frac{1}{2T_\mu s\left(T_\mu s + 1\right)}, \tag{11}$$

$$W_{\text{раз}}^{\text{ж(ЛО)}}(s) = \frac{1}{4T_\mu s\left(T_\mu s + 1\right)}, \tag{12}$$

где T_μ – малая некомпенсируемая постоянная времени.

Рассмотренная функция для симметричного оптимума (СО) запишется как:

$$W_{\text{раз}}^{\text{ж(СО)}}(s) = \frac{8T_\mu s + 1}{4T_\mu^2 s^2\left(T_\mu s + 1\right)}. \tag{13}$$

Для вывода передаточных функций регуляторов поделим выражения (10)–(12) на передаточную функцию (9), положив, что

$$T_\mu = \frac{1}{(1-D)^2}\frac{L}{R} = 2\xi T_2 = 6{,}67 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

ввиду невозможности разложить знаменатель функции (10) на множители. При изменении токового режима ИН значение T_μ, согласно приведённой выше формуле, и других параметров, содержащихся в выражениях передаточной функции разомкнутого контура тока (8)–(10), будут варьироваться, так как будет меняться скважность импульсов D. Однако, как показали исследования [1], эти изменения будут малыми, в пределах 5% для всего диапазона формируемого тока. На этих основаниях примем, что в 10%-й окрестности центра разложения регулятор обеспечит заданный режим работы без его подстройки и изменения структуры.

Полученные передаточные функции регуляторов имеют вид:

$$W_{\text{рег}}^{(\text{МО})}(s) = \frac{T_2^2 s^2 + T_\mu s + 1}{2T_\mu s\left(T_\mu s + 1\right)\left(T_1 s + 1\right)}, \tag{14}$$

$$W_{\text{рег}}^{(\text{ЛО})}(s) = \frac{T_2^2 s^2 + T_\mu s + 1}{4T_\mu s\left(T_\mu s + 1\right)\left(T_1 s + 1\right)}, \tag{15}$$

$$W_{\text{рег}}^{(\text{СО})}(s) = \frac{\left(8T_\mu s + 1\right)\left(T_2^2 s^2 + T_\mu s + 1\right)}{4T_\mu^2 s^2\left(T_\mu s + 1\right)\left(T_1 s + 1\right)}. \tag{16}$$

Несмотря на громоздкость выражений (14)–(16), они соответствуют структурно устойчивым звеньям, пригодным для реализации как в непрерывном, так и в дискретном виде.

Для исследования синтезированных регуляторов приведём замкнутые по току модели повышающего DC-DC-преобразователя в Matlab Simulink – нелинейную (**рис. 6**) с вычислением величины $D(t)$ в блоке, выделенным штриховой линией, и линеаризованную (**рис. 7**). Передаточные функции регуляторов последовательно в ходе численных экспериментов вводятся в блок Controller. Здесь $n = n(s)$ – числитель передаточных функций регуляторов (14)–(16) для каждого из оптимумов, а $d = d(s)$ – их знаменатель.

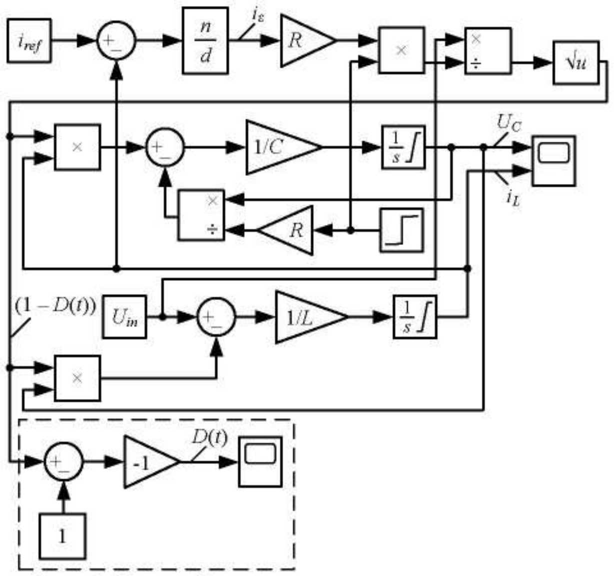


Рис. 6. Нелинейная замкнутая структурная схема формирователя тока в среде Matlab Simulink

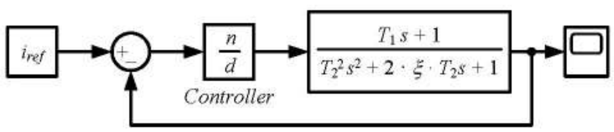


Рис. 7. Линеаризованная модель замкнутого по току повышающего DC-DC-преобразователя в среде Matlab Simulink

Переходные процессы по входному току $i_{in}(t)$ в замкнутой системе приведены на **рис. 8–10** для каждой настройки. Одновременно показаны графики для нелинейной (см. **рис. 6**) и линеаризованной (см. **рис. 7**) замкнутых по току моделей. Введено параметрическое возмущение в виде скачкообразного 10%-го уменьшения и увеличения сопротивления нагрузки R в моменты времени $t_1 = 0{,}04$ с и $t_2 = 0{,}08$ с соответственно. Также показаны увеличенные фрагменты начального запуска формирователя тока на 180 А.

Как видно из **рис. 8–10**, для нелинейных моделей при рассматриваемых настройках наблюдаются высокие значения перерегулирования по сравнению с линеаризованными только в период пуска. При набросе же и сбросе нагрузки перерегулирования в случае нелинейных моделей меньше, чем для их линейных аналогов. В **таблице** приведены основные показатели качества динамических характеристик (см. **рис. 8–10**) – время переходного процесса $t_{пп}$ и перерегулирование σ.

На основании этой таблицы выбираем настройку повышающего DC-DC-преобразователя на симметричный оптимум как базовую, так как при набросе и сбросе нагрузки она обеспечивает лучшие показатели качества – малое перерегулирование и время переходного процесса.

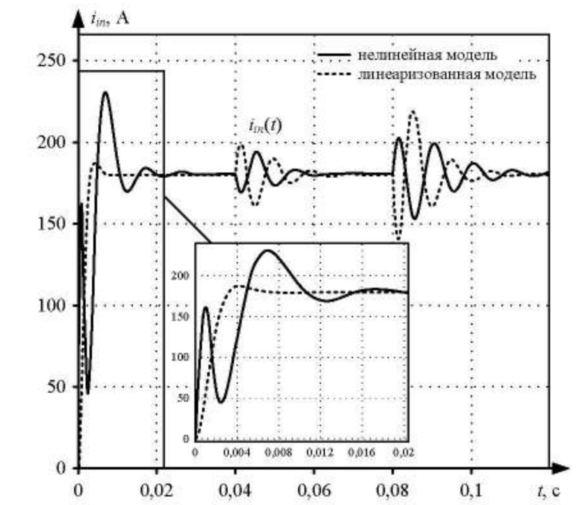


Рис. 8. Кривые входного тока в замнутой системе при настройке на МО

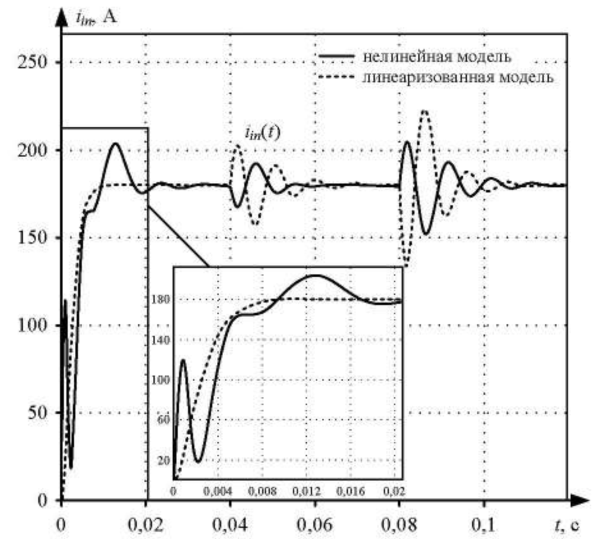


Рис. 9. Кривые входного тока в замнутой системе при настройке на ЛО

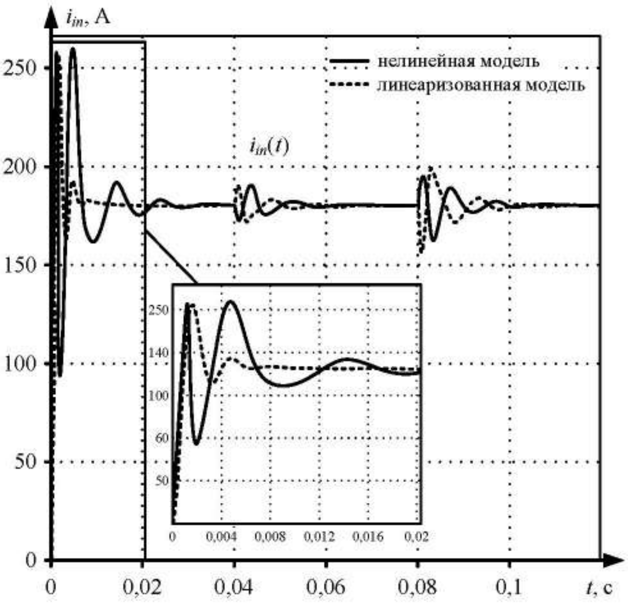


Рис. 10. Кривые входного тока в замнутой системе при настройке на СО

На **рис. 11** для нелинейной модели в одних осях проиллюстрированы нормированная кривая входного тока $i_{in}^*(t)$, отнесённого к значению 180 А, и скважность импульсов $D(t)$ при выходе тока нагрузки на номинальное значение и настройке на СО.

Укрупнённый фрагмент кривой $D(t)$ иллюстрирует её «провал» в отрицательную область в период пуска, что, безусловно, решается путём ограничения выхода регулятора в пределах от 0 до 1 о.е. Однако в практике разработки систем автоматического управления желательно стремиться к тому, чтобы управляющий сигнал находился в допустимых пределах, не приводя к ограничению выхода регулятора. Обеспечение этого условия является актуальной задачей для разработчиков нелинейных систем автоматического управления, решение которой позволяет достигать полной управляемости преобразователей с обратной связью для всех возможных статических и динамических режимов работы силовых преобразователей.

Для запуска повышающего DC-DC-преобразователя в работу предлагается применить линейное нарастание задания на ток, интенсивность которого определяется из снятых переходных процессов при скачкообразном сигнале i_{ref} (см. **рис. 10, 11**). Интенсивность нарастания этого сигнала при плавном пуске составила 3,5 А/мс с начальным значением 40 А. Это значение обусловлено исключением ограничения выхода регулятора на нулевом уровне в начале пуска (см. укрупнённый фрагмент на **рис. 11**). Таким образом, i_{ref} нарастает от 40 до 180 А за время 40 мс.

Кривые входного тока настроенного на СО повышающего DC-DC-преобразователя при плавном пуске приведены на **рис. 12**.

Показатели качества переходных процессов

Оптимум	Модульный						Линейный						Симметричный					
Режим	Пуск		Наброс		Сброс		Пуск		Наброс		Сброс		Пуск		Наброс		Сброс	
Модель (Л – линеаризованная, Н – нелинейная)	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н	Л	Н
$t_{пп}$, мс	2,76	13,5	10	6,8	15,5	4,68	6,33	15,5	11,5	7,4	12,8	13,1	5,32	15,3	1,1	4,1	4,35	4,55
σ, %	4,32	28,1	10,9	7,5	22	15,5	0	13,2	12,9	7,17	25,7	15,4	42,1	44,2	6,33	5,8	13,4	9,9

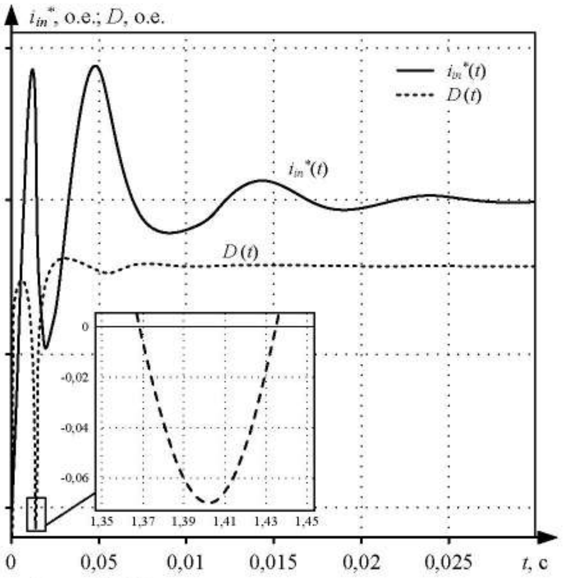


Рис. 11. Нормированная кривая входного тока и скважность импульсов при настройке на СО

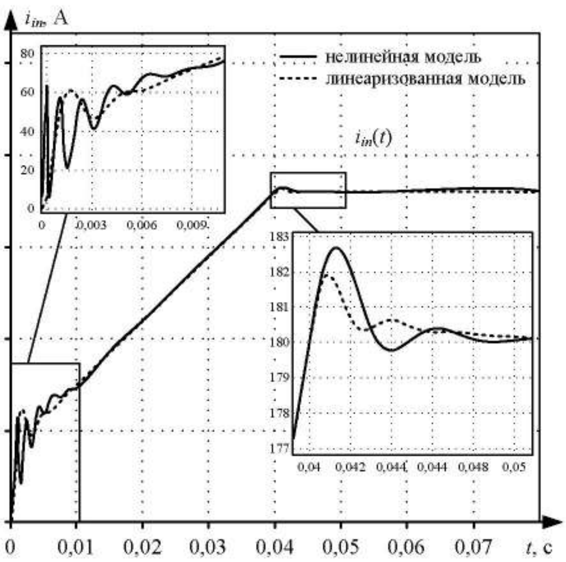


Рис. 12. Кривые входного тока при плавном пуске настроенного на СО повышающего DC-DC преобразователя

Различия результатов, полученных на нелинейной и линеаризованной моделях, видны из двух укрупнённых участков переходных характеристик (**рис. 12**). Однако максимальная динамическая ошибка не превышает 0,5%. Это говорит о том, что при настройке плавного пуска замкнутого повышающего DC-DC-преобразователя можно пользоваться линеаризованной моделью как надёжным ориентиром в процессе проектирования систем управления.

Проверим принятую настройку на нелинейной модели для крайних значений диапазона формируемого тока нагрузки, задав установившиеся значения заданий на ток i_{ref1} = 162 А, i_{ref2} = 198 А (**рис. 13**). Время нарастания оставим прежним – 40 мс, как и начальное значение задания – 40 А для обоих случаев.

Приведённые кривые подтверждают возможность применения регулятора, настроенного на расчётный режим в 10%-й окрестности центра разложения. Величины установившихся токов нагрузки равны соответствующим заданиям.

Начиная с момента времени 0,05 с, сформируем полный цикл нагружения системы электроснабжения автономного объекта следующим образом (**рис. 14**). В момент времени t_1 = 0,05 с задание на ток нагрузки меняется со 180 до 162 А, затем после окончания переходного процесса и выхода на статический режим в момент времени t_2 = 0,07 с происходит «возвращение» в точку, соответствующую центру разложения i_{in} = 180 А. Далее в момент времени t_3 = 0,09 с задание на ток меняется со 180 до 198 А, после чего в момент времени t_4 = 0,09 с ток снова соответствует расчётному значению 180 А.

Кривая $i_{in}(t)$, приведённая на этом рисунке, подтверждает правильность принятых допущений и соответствует условиям технического задания. Перерегулирование для всех переходных процессов не превышает 10%. Кроме того, при изменении задания на ток от 162 до 198 А скважность импульсов D будет меняться от 0,776 до 0,798. Следовательно, параметры передаточной функции линеаризованной модели будут меняться не более чем на 1,4% относительно значений, соответствующих центру разложения (i_{in} = 180 А при D = 0,79) во всём диапазоне формируемого тока. Это ещё раз подтверждает возможность использования линеаризованной модели для настройки регулятора тока.

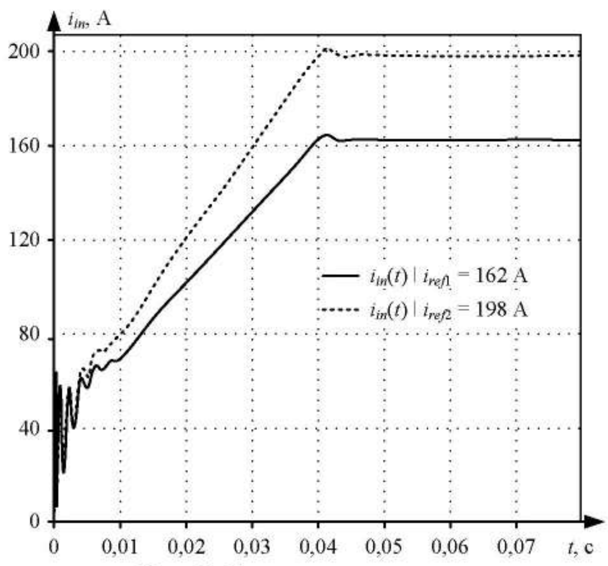


Рис. 13. Кривые тока нагрузки для крайних значений диапазона формируемого тока

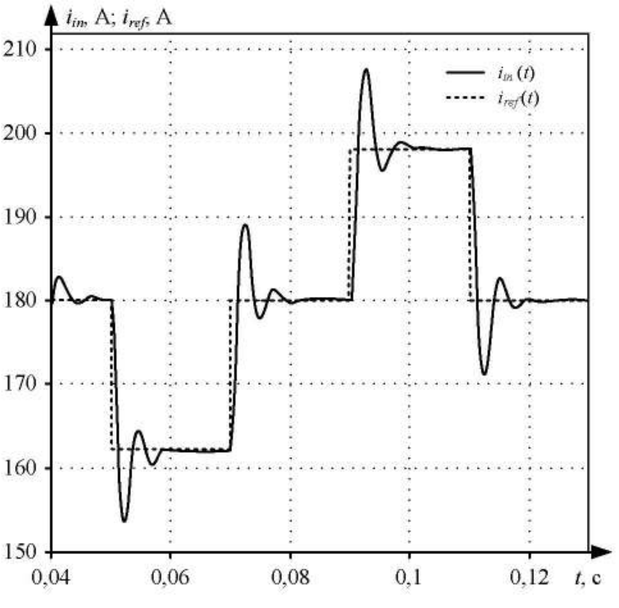


Рис. 14. Цикл нагружения системы электроснабжения автономного объекта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена нелинейная модель формирователя тока на базе повышающего DC-DC-преобразователя и предложена методика использования его линеаризованной модели для настройки регулятора. Получены основные соотношения для реализации структурной схемы нелинейной модели преобразователя, где входной величиной является задание на входной ток i_{ref} повышающего DC-DC-преобразователя. Выведена передаточная функция линеаризованной модели для режима работы, близкого к расчётному, при i_{ref} = 180 А. Эта функция используется для настройки регулятора преобразователя на модульный, линейный и симметричный оптимумы. Переходные процессы по входному току в замкнутом по входному току повышающем DC-DC-преобразователе для нелинейной и линеаризованной моделей заметно отличаются друг от друга в период пуска. Однако кривые тока имеют одинаковые установившиеся величины, соответствующие заданию на ток. Кроме того, применительно к рассмотренным нелинейной и линеаризованной моделям (см. **рис. 6** и **7** соответственно) регуляторы позволяют поддерживать заданное значение тока нагрузки при параметрических возмущениях в виде изменения эквивалентного выходного сопротивления преобразователя на 10% в меньшую и большую сторону. В качестве базовой была выбрана настройка замкнутого по току повышающего DC-DC-преобразователя на симметричный оптимум, так как это обеспечивает наименьшие значения времени переходного процесса и перерегулирования при варьировании эквивалентного сопротивления нагрузки. В период пуска выявлена проблема ограничения выхода регулятора на нулевом уровне, решение которой позволит в дальнейшем добиваться полной управляемости нелинейных преобразователей ИН во всех режимах работы (пуск, наброс и сброс нагрузки).

Для уменьшения перерегулирования и исключения ограничения выхода регулятора на нулевом уровне в период включения повышающего DC-DC-преобразователя на расчётную нагрузку был применён алгоритм плавного пуска, предусматривающий постепенное нарастание сигнала задания на формируемый входной ток i_{ref}. При этом интенсивность нарастания i_{ref} определяется с учётом анализа переходных процессов при скачкообразном изменении этого задания в замкнутом по току формирователе.

После выхода разработанного устройства на установившийся режим, соответствующий центру разложения 180 А, был сформирован цикл нагружения для системы электроснабжения автономного объекта (см. **рис. 14**). Результаты исследований подтвердили возможность применения линеаризованной модели для настройки регулятора тока и применения этого регулятора как для нелинейной модели, так и для проектируемого макетного образца.

Таким образом, предложенную нелинейную модель рекомендуется использовать для разработки различных вариантов имитаторов нагрузки на базе повышающего DC-DC-преобразователя. Линеаризованную модель предлагается применять для настройки регуляторов и задействовать эти настройки для нелинейной модели и макетного образца ИН, работающего в режимах, близких к принятому центру разложения.

Статья написана в рамках выполнения проекта FEWM-2020-0046 «Фундаментальные основы и методология создания высокоэффективного энергопреобразования для систем космического и морского назначения на базе интеллектуальных силовых модулей сверхвысокой степени интеграции».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю. Методика разработки имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 60-66. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66.
2. Юдинцев А.Г. Энергопреобразующие комплексы для наземной отработки и подтверждения прогнозируемой надёжности систем электропитания космических аппаратов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019. Т. 22, № 3. С. 95-102.
3. Рекутов О.Г., Юдинцев А.Г. Метод формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электропитания космических аппаратов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 26-32. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32.
4. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2018. 443 с.
5. Фролов В.Я., Смородинов В.В. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде Matlab – Simulink: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. 332 с.
6. Shaffer R. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007. 384 p.
7. Лукашенков А.В., Капустин И.В. Обобщенная математическая модель импульсного повышающего преобразователя напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 10. С. 189-198.
8. Лукас В.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 416 с.
9. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника: монография. М.: Техносфера, 2005. 632 с.

10. Rashid M. Power Electronics Handbook. Oxford, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2018. 1496 p.
11. Кояин Н.В., Мальцева О.П., Удут Л.С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, №7. С. 120-125.
12. Кояин Н.В., Мальцева О.П., Удут Л.С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по симметричному оптимуму // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, №7. С. 126-129.

Поступила в редакцию 13 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CURRENT DRIVER OF LOAD SIMULATOR FOR GROUND TESTING OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS OBJECTS

Anton G. Yudintsev

Ph.D. (Engineering), Director, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR, Tomsk, Russia. E-mail: yag@niiaem.tomsk.ru.

Alexander A. Tkachenko

Ph.D. (Engineering), Director, Head of the Information Technology Department of the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR, Tomsk, Russia. E-mail: aem@tusur.ru.

Danil Yu. Lyapunov

Ph.D. (Engineering), Senior Research Associate, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Associate Professor, the Department of Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering of the National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: lyapdy@gmail.com. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9326-3595.

The paper presents a nonlinear continuous mathematical model of a current driver based on a closed-loop DC-DC boost converter. This converter represents a subsystem of a load simulator for ground testing of power supplies for autonomous low power (up to several tens of kW) objects implemented for various purposes. We consider the current value of 180 A as a center of expansion. The load current must vary within the range of ±10% with respect to this center. The model of the current driver is implemented in both continuous and discrete forms in Matlab Simulink, taking into account parametric disturbances in the form of a change in the equivalent output resistance of the converter. The adequacy of the developed models was confirmed. The current transfer function of the DC-DC boost converter is obtained with the assumption that its parameters are constant. This function is used in the form of a block diagram and applied as a linearized model of an open loop current driver. This makes it possible to implement the model for adjusting the current regulator. The adjustments for modular, linear and symmetric optima are tested on the nonlinear continuous model. This model makes it possible to identify the features of the current driver performance during design stage, taking into account the parameter spread of the power circuit components. It also allows us to optimally adjust the regulators and readjust them taking into account the generated load current waveform. To perform a soft start of the closed current driver loop tuned to the symmetric optimum and to prevent a controller from limiting its output at zero level, a ramp function reference generator was implemented. Its parameters were calculated. The tuned controller provides the desired current of the load simulator within the range 10% around the center of expansion corresponding to 180 A. The proposed approach makes it possible to significantly reduce the time and cost for the process of designing a current driver as part of a load simulator for power supplies of autonomous objects. Numerical experiments carried out on a continuous nonlinear model confirm the correctness of the assumptions made. This suggests that the nonlinear model can be implemented to develop various structures of load simulators while the linearized model may serve as a reliable entity to adjust the current controller.

Keywords: current driver, load simulator, electrical complex, ground tests, power supply system, autonomous object, DC-DC boost voltage converter, controller adjustment, center of expansion, simulation model.

REFERENCES

1. Yudintsev A.G., Tkachenko A.A., Lyapunov D.Y. Methodology of Load Simulator Design for Ground Testing of Power Supply Systems of Autonomous Objects. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes] 2020; no. 1 (46), pp. 60–66. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66. [In Russian]
2. Yudintsev A.G. Energy Converting Complexes for Ground Testing and Ensuring Predicted Reliability of Power Supplies of Space Vehicles. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravleniya i radioelektronoki* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics] 2019; vol. 22, no. 3, pp. 95–102. [In Russian]
3. Rekutov O.G., Yudintsev A.G. Method of Forming a Volt Amper Characteristic of a Solar Array Simulator for Testing Power Supply Systems of Spacecraft. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2020, no. 2 (47), pp. 26–32. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32. [In Russian]
4. German-Galkin S.G. *Virtualhye laboratorii poluprovodnikovykh system v srede Matlab-Simulink* [Virtual Semiconductor System Labs in Matlab-Simulink]. St. Peterburg: Lan, 2018. 443 p. [In Russian]
5. Frolov V.Y., Smorodinov V.V. *Ustroystva silovoy elektroniki i preobrazovatelnoy tekhniki s razomknutymi i zamknutymi sistemami upravleniya v srede Matlab – Simulink* [Power Electronic Devices and Converting Technology Using Open-Loop and Feedback Control Systems in Matlab – Simulink]. St. Petersberg: Lan, 2018. 332 p. [In Russian]
6. Shaffer R. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007. 384 p.
7. Lukashenkov A.V. Generalized Mathematical Model of Pulse Boost Voltage Converter. *Izvestuya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences]. 2012, no. 10, pp. 189–198. [In Russian]
8. Lukas V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of

Automatic Control]. Moscow: Nedra, 1990. 416 p. [In Russian]
9. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatelnaya tekhnika* [Transistor Converter Technology], Moscow: Tehnosfera, 2005. 632 p.
10. Rashid, M. Power Electronics Handbook. Oxford, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2018. 1496 p.
11. Koyain N.V., Maltseva O.P., Udut L.S. Optimization of Regulation Loops of Electric Drive Systems by Standard Methods. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2005, no. 308(7), pp.120–125. [In Russian]
12. Koyain N.V., Maltseva O.P., Udut L.S. Optimization of Regulation Loops of Electric Drive Systems by Symmetric Optimum. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2005. no. 308(7), pp. 126–129. [In Russian]

Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю. Формирователь тока имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электроснабжения автономных объектов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 64-72. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-64-72

Yudintsev A.G., Tkachenko A.A., Lyapunov D.Yu. Current Driver of Load Simulator for Ground Testing of Power Supply Systems of Autonomous Objects. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 64-72. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-64-72

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бакайкина Ольга Александровна – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Барбасова Татьяна Александровна – канд. техн. наук, доцент, высшая школа электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: barbasovata@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2248-2894.

Белоусов Алексей Сергеевич – аспирант, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: 011bas962@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9464-2260.

Богачков Иван Михайлович – главный специалист, электротехнический отдел, Тюменский Филиал ООО «Газпром проектирование», г. Тюмень, Россия. E-mail: Bogim83@mail.ru.

Валиев Мустафа Карямович – канд. техн. наук, главный специалист по электротехническим решениям, отдел проектирования и экспертизы проектов, НОВАТЭК – Научно-технический центр, г. Тюмень, Россия. E-mail: mustafa.veliev@novatek.ru.

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4675-7511.

Воприков Антон Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия.

Григорьев Николай Потапович – канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Джагаров Николай Филев – д-р техн. наук, профессор, кафедра электротехники, Высшее военно-морское училище имени Николы Вапцарова, г. Варна, Болгария. E-mail: n.dzhagarov@naval-acad.bg. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4234-4659.

Долгошеев Виктор Васильевич – аспирант, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: nrgvictor@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4747-7004.

Ковалёв Владимир Александрович – аспирант, кафедра электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия.

Красильникова Татьяна Германовна – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. E-mail: tatka552005@yandex.ru.

Ляпунов Данил Юрьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», доцент, отделение электроэнергетики и электротехники, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия. E-mail: lyapdy@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9326-3595.

Майоров Михаил Андреевич – аспирант, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: michaelmaiorov@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1221-8862.

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: malapheev_av@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1471-9764.

Махмудов Кароматулло Азизович – старший преподаватель, кафедра систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. E-mail: mahmudovkaromat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2127-3772.

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: mesherek@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0984-5133.

Парфианович Арсений Петрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия.

Сафаралиев Муродбек Холназарович – инженер-исследователь, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: murodbek_03@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3433-9742.

Соломин Евгений Викторович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: solominev@susu.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4694-0490.

Ткаченко Александр Александрович – канд. техн. наук, директор, заведующий информационно-техническим отделом, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: aem@tusur.ru.

Трофимович Полина Николаевна – старший преподаватель, кафедра электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: ptrofimovich@bk.ru.

Хамитов Рустам Нуриманович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электрической техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия. E-mail: apple_27@mail.ru.

Христинич Алексей Романович – канд. техн. наук, доцент, кафедра систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС в Красноярске, г. Красноярск, Россия. E-mail: lex_0986@mail.ru.

Христинич Елена Витальевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра теоретических основ электротехники, Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия. E-mail: ekhristinich@mail.ru.

Христинич Роман Мирославович – д-р техн. наук, профессор, кафедра теоретических основ электротехники, Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия. E-mail: rkhristinich@mail.ru.

Юдинцев Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, директор, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: yag@niiaem.tomsk.ru.

Юнусов Парвиз Алиевич – аспирант, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gamberro90@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1854-5282.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

С 26.03.2019 журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки);

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов:

- рукопись, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора.

МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Г.И. НОСОВА

Life Is On | Schneider Electric

Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова»

Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.

Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова»:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматики. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.